



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**JOONAS SALONEN**

**LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNISESTI TURVALLISET LÄHIÖKERROSTALO-  
JEN KORJAUSRATKAISUT PUUELEMENTEILLÄ SUOMESSA**

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Talouden ja rakentamisen tiedekun-  
nassa 08. lokakuuta 2014

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

**SALONEN, JOONAS:** Lämpö- ja kosteusteknisesti turvalliset lähiökerrostalojen korjausratkaisut puuelementeillä Suomessa

Diplomityö, 129 sivua, 12 liitesivua

Toukokuu 2015

Pääaine: Rakennustuotanto

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Avainsanat: Lähiökerrostalojen korjaaminen, KLIKK, CLT, TES, Puiset julkisivuelementit, Tilaelementit, Kosteuden kondensoituminen, Homeen kasvu

Tulevaisuudessa rakentamisessa ollaan siirtymässä yhä enemmän korjaus- ja täydennysrakentamiseen. Suomessa 1960–1970-luvuilla rakennetut kerrostalot ovat tulossa korjausikään ja korjauksen lisäksi myös niiden energiatehokkuutta tulisi parantaa. Tässä diplomityössä oli tavoitteena selvittää laskennallisesti kerrostalojen julkisivukorjauksessa ja täydennysrakentamisessa käytettävien puisten julkisivu- ja tilaelementtien lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta Suomen ilmastossa. Tutkittavina rakenteina oli puu-, tiili- ja levyrappaus verhottuja puurunkoisia seinärakenteita. Laskennallisessa mallintamisessa tutkittiin ehdotettujen korjausratkaisujen homeutumisen- ja kondensoitumisriskiä. Lisäksi riskirakenteista tehtiin korvaavat, lämpö- ja kosteusteknisesti toimivat, rakenneratkaisut.

Laskennat suoritettiin Delphin 5.8.1-simulointiohjelmalla. Mitoittavina sisä- ja ulkoilman olosuhteina käytettiin Suomen ilmastossa rakennusfysikaalisesti mitoittavia kriittisiä olosuhteita, jotka on määritetty Tampereen teknillisessä yliopistossa aiemmissa projekteissa. Sisäilman olosuhteina käytettiin RIL 107–2012:ssa annettuja sisäilman lämpötilan ja kosteuslisän mitoitusarvoja kosteusluokassa 2. Ulkoilman olosuhteina käytettiin Jokioisen ja Vantaan testivuotia nyky- ja tulevaisuuden ilmastoissa. Homeen kasvua rakenteissa arvioitiin VTT:n ja TTY:n kehittämän parannetun homemallin avulla, jossa homeen kasvua kuvataan homeindeksillä (M). Homeindeksin raja-arvona tässä työssä pidettiin arvoa  $M < 1$ , joka tarkoittaa sitä, että homeenkasvua ei sallittu lainkaan tarkasteltavissa pisteissä lämmöneristeen ulko- ja sisäpinnoissa. Kosteuden kondensoitumisen raja-arvoksi tarkastelupisteissä asetettiin suhteellisen kosteuden arvo 97 % RH, jonka yläpuolelle suhteellinen kosteus ei saanut nousta. Laskentatulosten analysointi tehtiin laskennan toisen vuoden tuloksista. Ohjelman tuottamista tiedoista kerättiin rakenteissa vallitsevat kosteus- ja lämpöolosuhteet valituissa tarkastelupisteissä.

Tehtyjen tutkimusten mukaan voidaan todeta, että puurankarunkoiset (TES) ja CLT-runkoiset julkisivu- ja tilaelementit ovat lämpö- ja kosteusteknisesti toimivia korjausratkaisuja kerrostalojen korjaamiseen, kun huolehditaan tuulensuojan riittävästä lämmönvastuksesta tai lisäeristyksestä tuulensuojan ulkopuolella. Toimiviksi tuulensuojaratkaisuksi laskelmissa havaittiin rakenteesta riippuen tuulensuojakipsilevyn päälle asennettava 50 mm paksu lämmöneristevilla tai tuulensuojakipsilevyn tilalle asennettava jäykä, tuulensuojapinnoitettu 30 mm paksu tuulensuojavilla. Ilmastonmuutos heikentää rakenteiden toimintaa, mutta edellä mainitulla tavalla rakenteet saatiin laskentatarkasteleissa toimiviksi myös tulevaisuuden ilmastossa. Kaikki julkisivuverhouksena käytetyt vaihtoehdot olivat toimivia ratkaisuja, mutta tiiviimpi ulkoverhous, kuten levyrappaus ja paksumpi puuverhous paransivat hieman julkisivuelementtien lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Masters's Degree Programme in construction Technology

**SALONEN, JOONAS:** Hygrothermally risk-free structural solutions for renovation of suburban multistorey buildings with wooden prefabricated elements in Finland

Master of Science Thesis, 129 pages, 12 appendix pages

May 2015

Major: Construction Economics

Examiner: professor Juha Vinha

Keywords: Renovation of suburban multistorey buildings, KLIKK, CLT, TES, Wooden prefabricated elements, Condensation, Mould growth

In the near future construction business will focus on the renovation of suburbs in Finland. The concrete-frame suburban multistorey buildings in Finland that have been built during the 1960's and 1970's are widely in poor condition and needs to be repaired. In addition to the renovation, also the energy efficiency of these buildings should be improved. The main goal of this master's thesis was to find computationally hygrothermally risk free prefabricated wooden façade-elements and module-elements for renovation of suburb apartment buildings in Finland. Studies were made in the present and in the future Finnish climate. Wood cladded, brick cladded and ventilated rendered timber framed wall structures were examined. In the computational modeling the moulding risk and condensing risk of the renovation solutions was studied.

The computational calculations were performed with German numerical simulation program called Delphin 5.8.1. Critical conditions that were used as dimensioning conditions of indoor air and outdoor air have been defined in the Tampere University of Technology (TUT) in previous projects. The design values of the temperature and moisture addition of the indoor air, which are given in RIL 107–2012, were used as conditions of the indoor air in moisture class 2. The test years of Jokioinen and Vantaa were used as conditions of outdoor air in the present and future climates. The growth of the mould in the structures was estimated with the improved mould growth model developed in co-operation by the Technical Research Centre of Finland and TUT. Determination of mould growth in the improved mould model is based on the mould index,  $M$ , used in the experiments for visual inspection. In the master's thesis, the maximum value of mould index was  $M < 1$ , which means that mould growth was not allowed at all. As the limit of the moisture condensation, the value of the relative humidity was set to 97 % RH above which the relative humidity was not allowed to rise. The analysis of calculation results was made from the results of the second year calculations. From the information produced by the program, the moisture conditions and heat conditions, which prevail in the structures, were collected from chosen examination points.

According to the studies made in this masters' thesis one can state that timber-framed (TES) and CLT-framed façade- and module-elements are hygrothermally risk-free solutions for suburb apartment renovations when the heat resistance of the wind shelter is sufficient. A 50 mm thick additional insulation over the windbreak gypsum board or 30 mm thick windbreak wool was found to be functional windbreak solutions for studied structures. The climate change weakens the operation of studied structures but in the above-mentioned way, the structures were gotten functional also in the future Finnish climate.



## ALKUSANAT

Rakentaminen on ollut lähellä sydäntäni jo pienestä lähtien. Olen päässyt mukaan erilaisiin rakennusprojekteihin nuoresta saakka vanhempieni luomutilalla. Lukion alussa päätin, että haluan opiskelemaan rakennustekniikan diplomi-insinööriksi Tampereelle. Vuonna 2009 aloitin opinnot TTY:llä ja opintojen edetessä olen saanut huomata, että alan valinta osoittautui oikeaksi ja kiinnostus rakennusalaa kohtaan on kasvanut entisestään.

Tämä diplomityö on tehty osana kansallista KLIKK-hanketta Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella rakennusfysiikan tutkimusryhmässä vuonna 2015. Diplomityön aihe on saatu Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitokselta, rakennusfysiikan ryhmästä. Työn ohjaajina toimivat TTY:n Rakennusfysiikan ryhmästä professori Juha Vinha sekä projektipäällikkö Anssi Laukkarinen, joita haluan kiittää työn järjestämisestä ja ohjauksesta. Haluan kiittää myös työtoveriani Hannanooraa vertaistuesta diplomityön tekemisessä. Lähiökerrostalojen korjaamiseen tarkoitettujen puuelementtien tutkiminen diplomityössä oli antoisaa ja haluan kiittää Juha Vinhaa aiheen antamisesta. Toivon, että työssä tekemiäni tutkimuksia hyödynnetään lähiöiden korjaamisessa ja puun käyttöä korjausrakentamisessa kehitetään eteenpäin.

Iso kiitos myös vanhemmilleni, isoveljelleni ja opiskeluystävilleni kannustuksesta ja tuesta pitkän opiskelurupeaman aikana. Haluan kiittää ystäviäni myös hauskoista vapaa-ajan hetkistä, jotka ovat tasapainottaneet opiskelua.

Lopuksi haluan kiittää kihlattuani Mariaa, joka on tukenut ja kannustanut minua eteenpäin koko opiskelujeni ajan ja kestänyt välillä raskaatkin opintojaksot sekä järjestänyt mukavat kotiolot opiskelun ja työn vastapainoksi.

Tampereella 25.5.2015

Joonas Salonen

## SISÄLLYS

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Johdanto .....   | 1  |
| 1.1   | Tutkimushankkeen tausta.....   | 1  |
| 1.2   | Tavoitteet ja rajaukset .....  | 2  |
| 1.3   | Tutkimuksen suoritus .....   | 3  |
| 1.4   | Tutkimuksen rakenne .....  | 3  |
| 2     | Tutkimuksen tausta .....   | 5  |
| 2.1   | KLIKK-hanke .....  | 5  |
| 2.2   | Kerrostalojen rakentaminen Suomessa .....                              | 8  |
| 2.3   | Kerrostalojen julkisivukorjaus .....                                   | 10 |
| 2.3.1 | Kerrostalojen julkisivukorjaus puuelementeillä Suomessa .....          | 10 |
| 2.4   | FRAME-projektin tulokset rankarakenteisten seinien toimivuudesta ..... | 13 |
| 3     | Puuelementit kerrostalojen korjauksessa – CLT ja TES.....              | 16 |
| 3.1   | Puun mahdollisuudet kerrostalojen korjauksessa .....                   | 16 |
| 3.2   | Puun fysikaaliset ominaisuudet.....                                    | 17 |
| 3.3   | Korjauskäyttöön soveltuvien puujulkisivujen rakenneratkaisut .....     | 18 |
| 3.4   | CLT .....  | 20 |
| 3.4.1 | Lämpötekniset ominaisuudet .....                                       | 22 |
| 3.4.2 | Kosteustekniset ominaisuudet .....                                     | 23 |
| 3.4.3 | CLT-elementti.....   | 24 |
| 3.4.4 | CLT-elementeistä tehty tutkimus Suomessa .....                         | 26 |
| 3.5   | TES .....  | 27 |
| 3.5.1 | Lämpötekniset ominaisuudet .....                                       | 30 |
| 3.5.2 | Kosteustekniset ominaisuudet .....                                     | 31 |
| 3.5.3 | TES-elementti .....  | 31 |
| 4     | Lämmön ja kosteuden siirtymisen teoriaa .....                          | 33 |
| 4.1   | Lämmön siirtymismuodot .....   | 33 |
| 4.1.1 | Johtuminen.....  | 33 |
| 4.1.2 | Säteily .....  | 36 |
| 4.1.3 | Konvektio .....  | 41 |
| 4.2   | Kosteus.....   | 43 |
| 4.2.1 | Ilman kosteus .....  | 45 |
| 4.2.2 | Sisäilman kosteuslisä .....  | 46 |
| 4.2.3 | Sade .....   | 48 |
| 4.3   | Kosteuden siirtymismuodot .....  | 49 |
| 4.3.1 | Vesihöyryn diffuusio .....   | 50 |
| 4.3.2 | Kosteuden konvektio .....  | 55 |
| 4.3.3 | Kapillaarinen kosteuden siirtyminen .....                              | 57 |
| 5     | Materiaalien homehtuminen .....  | 58 |
| 5.1   | Mikrobit ja puun vaurioituminen .....                                  | 58 |
| 5.2   | Parannettu homemalli .....   | 59 |
| 6     | Rakenteiden toiminnan tarkasteluperiaatteet .....                      | 66 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 6.1    | Rakennusfysikaalisten laskentatarkastelujen perusteet.....                  | 66  |
| 6.2    | Rakenteiden toimintakriteerit.....  | 67  |
| 6.2.1  | Homeen kasvu.....   | 67  |
| 6.2.2  | Kosteuden kondensoituminen.....   | 69  |
| 6.3    | Ohjeet ja määräykset rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä toiminnasta... | 70  |
| 6.4    | Sisä- ja ulkoilman olosuhteet.....  | 72  |
| 7      | Laskentatarkastelujen suorittaminen.....                                    | 74  |
| 7.1    | Tutkimusmenetelmä.....  | 74  |
| 7.2    | Materiaaliominaisuudet.....   | 76  |
| 7.3    | Olosuhteet.....   | 76  |
| 7.4    | Raja-arvot.....   | 78  |
| 7.5    | Valitut tarkastelupisteet.....  | 79  |
| 8      | Tulosten tarkastelu.....  | 80  |
| 8.1    | Laskennan tulokset.....   | 80  |
| 8.1.1  | Rakenne US 1, puuverhoiltu TES-elementti.....                               | 80  |
|        | Alkuperäinen versio US 1.1.....   | 80  |
|        | Korjattu versio US 1.2.....   | 82  |
|        | Korjattu versio US 1.3.....   | 84  |
| 8.1.2  | Rakenne US 2, puuverhoiltu TES-elementti.....                               | 85  |
|        | Alkuperäinen versio US 2.1.....   | 85  |
| 8.1.3  | Rakenne US 3, puuverhoiltu TES-elementti.....                               | 86  |
|        | Alkuperäinen versio US 3.1.....   | 86  |
| 8.1.4  | Rakenne US 4, rapattu TES-elementti.....                                    | 88  |
|        | Alkuperäinen versio US 4.1.....   | 88  |
| 8.1.5  | Rakenne US 5, tiiliverhoiltu TES-elementti.....                             | 90  |
|        | Alkuperäinen versio US 5.1.....   | 90  |
| 8.1.6  | Rakenne US 6, puuverhoiltu TES-elementti.....                               | 92  |
|        | Alkuperäinen versio US 6.1.....   | 92  |
| 8.1.7  | Rakenne US 7, puuverhoiltu CLT-elementti.....                               | 93  |
|        | Alkuperäinen versio US 7.1.....   | 93  |
| 8.1.8  | Rakenne US 8, puuverhoiltu CLT-tilaelementti.....                           | 95  |
|        | Alkuperäinen versio US 8.1.....   | 95  |
|        | Korjattu versio US 8.2.....   | 96  |
|        | Korjattu versio US 8.3.....   | 97  |
| 8.1.9  | Rakenne US 9, puuverhoiltu TES-elementti.....                               | 98  |
|        | Alkuperäinen versio US 9.1.....   | 98  |
|        | Korjattu versio US 9.2.....   | 100 |
|        | Korjattu versio US 9.3.....   | 101 |
| 8.1.10 | Rakenne US 10, puuverhoiltu TES-tilaelementti.....                          | 102 |
|        | Alkuperäinen versio 10.1.....   | 102 |
|        | Korjattu versio 10.2.....   | 104 |
| 8.2    | Tuuletusvälien ilmanvaihtuvuuksien vertailu.....                            | 105 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 8.2.1 | Puuverhoiltu julkisivuelementtirakenne US 1.2 .....                | 105 |
| 8.3   | Tuulensuojan lämmönvastusten vertailu .....                        | 107 |
| 8.4   | Rakenteen tiiviys .....  | 108 |
| 9     | Laskentatulosten analysointi .....                                 | 114 |
| 9.1   | Perusratkaisut ja hyvin lämpöä eristävän tuulensuojan käyttö ..... | 114 |
| 9.2   | Lisätarkastelut .....  | 115 |
| 9.2.1 | Tarkastelupisteiden väliset erot .....                             | 115 |
| 9.2.2 | Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus .....                                | 115 |
| 9.2.3 | Ulkoverhouksen vaikutus .....                                      | 116 |
| 9.2.4 | Ilmastonmuutos .....   | 117 |
| 9.3   | Virhearvio .....   | 117 |
| 10    | Yhteenveto ja johtopäätökset .....                                 | 119 |
| 10.1  | Yhteenveto .....   | 119 |
| 10.2  | Johtopäätökset .....   | 120 |
| 10.3  | Tutkimusmenetelmien tarkastelu .....                               | 122 |
| 10.4  | Jatkotutkimusehdotukset .....                                      | 123 |
|       | Lähteet .....  | 124 |
|       | Liitteet .....   | 129 |
|       | Liite 1: Laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet .....         | 129 |
|       | Liite 2: Materiaalien tasapainokosteuskäyrät .....                 | 129 |
|       | Liite 3: Rakennusfysikaaliset testivuodet .....                    | 129 |



## LYHENTEET JA MERKINNÄT

|               |                                     |  |
|---------------|-------------------------------------|--|
| $\alpha$      | auringonsäteilyn absorptiokerroin   | -  |
| $\beta$       | kerroin                             | -  |
| $\delta_v$    | vesihöyryn läpäisevyys              | $\text{m}^2/\text{s}, \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ |
| $\varepsilon$ | emissiviteetti                      | -  |
| $\lambda$     | lämmönjohtavuus                     | $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$                                       |
| $\mu$         | diffusiovastuskerroin               | -  |
| $\nu$         | vesihöyrypitoisuus                  | $\text{kg}/\text{m}^3, \text{g}/\text{m}^3$                                |
| $\Delta v$    | sisäilman kosteuslisä               | $\text{kg}/\text{m}^3$   |
| $\rho$        | tiheys                              | $\text{kg}/\text{m}^3$   |
| $\sigma$      | Stefan-Boltzmannin säteilyvakio     | $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$              |
| $\varphi$     | ilman suhteellinen kosteus          | % RH   |
| $\Phi$        | lämpövirta                          | W  |
| $a$           | terminen diffusiviteetti            | $\text{m}^2/\text{s}$  |
| $c$           | ominaislämpökapasiteetti            | $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$                                      |
| $g$           | kosteusvirran tiheys                | $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$                                    |
| $m$           | massa                               | kg   |
| $n$           | ilmanvaihtokerroin                  | 1/h  |
| $n_{50}$      | ilmanvuotoluku (50 Pa paine-erolla) | 1/h  |
| $p$           | paine                               | Pa   |
| $q$           | lämpövirran tiheys                  | $\text{W}/\text{m}^2$  |
| $s_d$         | suhteellinen diffusiovastus         | m  |
| $t$           | aika                                | s, h, d, a   |
| $G$           | kosteusvirta                        | $\text{kg}/\text{s}$   |
| $K_a$         | ilmanläpäisykerroin                 | $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$                   |
| $M$           | homeindeksi                         | -  |
| $R$           | lämmönvastus                        | $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$                                       |
| $R$           | yleinen kaasuvakio                  | 8314,3 $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$                            |
| $T$           | lämpötila                           | $^{\circ}\text{C}, \text{K}$   |
| $U$           | lämmönläpäisykerroin                | $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$                                     |
| $V$           | tilavuus                            | $\text{m}^3$   |
| $W$           | vesihöyrynläpäisykerroin            | $\text{m}/\text{s}, \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ |
| $Z$           | vesihöyrynvastus                    | $\text{s}/\text{m}, \text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$   |

|       |   |
|-------|---|
| CLT   | Cross Laminated Timber (Ristiin liimattu puu) |
| FRAME | Future Envelope Assemblies and HVAC Solutions |
| HHL   | homehtumisherkkyyssluokka                     |
| HTL   | homekasvun taantumaluokka                     |
| TTY   | Tampereen teknillinen yliopisto               |
| VTT   | Teknologian tutkimuskeskus VTT                |
| TES   | Timber based element system                   |

# MÄÄRITELMÄT

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Diffuusio                 | Diffuusio on kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevia yksittäisen kaasun pitoisuuseroja (tai osa-paine-eroja). Diffuusiossa kaasu siirtyy korkeammasta pitoisuudesta alemmaa pitoisuutta kohten.  |
| Homehtumisherkkyyssluokka | Homehtumisherkkyyssluokalla (HHL) kuvataan rakennusmateriaalin homehtumisherkkyyttä VTT:n ja TTY:n kehittämässä parannetussa homemallissa. Rakennusmateriaalit on jaettu neljään eri homehtumisherkkyyssluokkaan.  |
| Homeindeksi               | Homeindeksi (M) kuvaa tarkasteltavan materiaalin pinnalla esiintyvien homeiden peittämää pinta-alaa suhteessa pinnan koko alaan näköhavaintoon perustuen. Indeksillä vaihtelee välillä 0–6. Indeksia määritettäessä ei erotella eri homelajeja toisistaan.   |
| Homekasvun taantumaluokka | Homekasvun taantumaluokalla (HTL) kuvataan homekasvuston määrän vähenemistä sekä homeen kasvussa tapahtuvaa viivettä rakennusmateriaalin pinnalla VTT:n ja TTY:n kehittämässä parannetussa homemallissa. Rakennusmateriaalit on jaettu neljään eri homekasvun taantumaluokkaan.                        |
| Hygroσκοoppisuus          | Hygroσκοoppisuus tarkoittaa huokoisen aineen kykyä sitoa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan.   |
| Höyrynsulku               | Ainekerros, jonka pääasiallisena tehtävänä on estää vesihöyryn haitallinen diffuusio rakenteeseen tai rakenteessa.   |
| Ilmanläpäisevyys          | Ilmanläpäisevyys ( $k_a$ ) ilmoittaa ilman tilavuuden, joka stationääritilassa laminaarisena virtauksena läpäisee koh-tisuorasti pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön pak-suisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen paine-ero on yksikön suuruinen. |
| Ilmanläpäisykerroin       | Ilmanläpäisykerroin ( $K_a$ ) ilmoittaa ilman tilavuuden, joka stationääritilassa laminaarisena virtauksena läpäisee koh-tisuorasti pinta-alayksikön suuruisen rakennusosan, kun ra-kennusosan eri puolilla olevien ilmatilojen paine-ero on yk-sikön suuruinen.                                       |

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Ilmansulku                | Ainekerros, jonka pääasiallisena tehtävänä on estää haitallinen ilmavirtaus rakenteen läpi.  |
| Johtuminen                | Johtumisessa lämpöenergia siirtyy aineen molekyyliden välillä tapahtuvan sisäisen värähtelyn vaikutuksesta korkeammasta lämpötilasta matalampaan ilman aineen molekyylien nettoliikettä.   |
| Kapillaarisuus            | Kapillaarisuus tarkoittaa materiaalin kykyä siirtää vettä ohuissa materiaalihuokosputkissa vaikuttavien kapillaarivoimien (adheesio ja koheesio) vaikutuksesta huokosputkien täyttyessä vedellä.   |
| Konvektio                 | Konvektio syntyy, kun kaasu tai neste virtaa ulkopuolisen voiman (pakotettu konvektio, esimerkiksi tuuli tai ilmanvaihtolaitteisto) tai lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen (luonnollinen konvektio) vaikutuksesta. Lämpö ja vesihöyry siirtyvät konvektiolla virtaavan ilman mukana.  |
| Kondensoituminen          | Kondensoituminen tarkoittaa vesihöyryn tiivistymistä rakenteen sisällä tai pinnalla vedeksi tai jääksi, kun ilman vesihöyrypitoisuus on saavuttanut kyseisessä kohdassa kyllästyskosteuspitoisuuden ( $\varphi = 100 \% RH$ ).   |
| Kyllästyskosteuspitoisuus | Kyllästyskosteuspitoisuus ( $v_{sat}$ ) ilmoittaa vesihöyrypitoisuuden maksimimäärän, joka ilmaan mahtuu tietyssä lämpötilassa   |
| Lämmönjohtavuus           | Lämmönjohtavuus ( $\lambda$ ) ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien tilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen.  |
| Lämmönläpäisykerroin      | Lämmönläpäisykerroin ( $U$ ) ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen rakennusosan, kun rakennusosan eri puolilla olevien tilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen. Rakennusosan $U$ -arvo on kokonaislämmönvastuksen käänteisarvo, jossa ovat mukana myös rakennusosan sisä- ja ulkopinnan pintavastukset. |

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Lämmönvastus          | Lämmönvastus ( $R$ ) ilmoittaa stationääritilanteessa ainekerroksen tai rakennusosan eri puolilla olevien isotermisten pintojen lämpötilaeron ja ainekerroksen tai rakennusosan läpi kulkevan lämpövirran tiheyden suhteen. Homogeenisen ainekerroksen lämmönvastus saadaan jakamalla kerroksen paksuus sen lämmönjohtavuudella $R = d/\lambda$ .   |
| Sisäinen konvektio    | Konvektiovirtaus ilmaa läpäisevän materiaalin sisällä. Sisäinen konvektio on yleensä lämpötilaeroista johtuvaa luonnollista konvektiota, mutta se voi sisältää myös tuulen aiheuttamaa pakotettua konvektiota.  |
| Suhteellinen kosteus  | Ilman suhteellinen kosteus ( $\phi$ ) ilmoittaa, kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä kyllästyskosteuspitoisuuteen verrattuna tietyssä lämpötilassa.   |
| Vesihöyrynläpäisevyys | Vesihöyrynläpäisevyys ( $\delta_v$ tai $\delta_p$ ) ilmoittaa vesihöyrymäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun vesihöyrypitoisuusero (tai vesihöyryn osapaine-ero) ainekerroksen eri puolilla on yksikön suuruinen.  |
| Vesihöyrynvastus      | Vesihöyrynvastus ( $Z_v$ tai $Z_p$ ) ilmoittaa stationääritilassa ainekerroksen tai rakennusosan eri puolilla olevan vesihöyrypitoisuuseron (tai vesihöyryn osapaine-eron) ja ainekerroksen tai rakennusosan läpi kulkevan kosteusvirran tiheyden suhteen. Homogeenisen ainekerroksen vesihöyrynvastus saadaan jakamalla kerroksen paksuus sen vesihöyrynläpäisevyydellä $Z = d/\delta$ .     |
| Vesihöyrypitoisuus    | Vesihöyrypitoisuus ( $v$ ) tarkoittaa ilman sisältämän vesihöyryn määrää tilavuuteen suhteutettuna.   |
| Viistosade            | Viistosade (WDR) tarkoittaa sateen vaakasuuntaista komponenttia, joka syntyy tuulen vaikutuksesta. Maanpinnan suuntaisesti puhaltava tuuli kuljettaa myös ilmassa mahdollisesti olevia sadepisaroita mukanaan, jolloin ne liikkuvat maanpintaan nähden sekä alaspäin että vaakasuuntaisesti. Viistosade aiheuttaa kosteuskuormitusta pääasiassa rakennusten tuulenpuoleisille pystypinnoille. |





# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tutkimushankkeen tausta

Tulevaisuudessa rakentaminen on siirtymässä yhä enemmän korjaus- ja täydennysrakentamiseen. Suomessa 1960–1970-luvuilla rakennetut kerrostalot ovat tulossa korjausikään ja korjauksen lisäksi myös niiden energiatehokkuutta tulisi parantaa. (Soikkeli 2011) Vuodesta 2013 lähtien energiatehokkuuden parantamiseen liittyviä vaatimuksia on kohdennettu myös nykyiseen rakennuskantaan siinä tapauksessa, jos rakennuksia muutoinkin korjataan. Suomessa oli vuonna 2008 noin 1 219 000 kerrostaloasuntoa joista noin 570 000 sijaitsee 1960–1970-luvuilla rakennetuissa betonirunkoisissa kerrostaloissa (Suomen virallinen tilasto SVT 2008). Lähiöiden korjausurakka on siis erittäin laaja ja koskee suurta osaa Suomen väestöstä. Näiden 60–70-luvun kerrostalojen tyypillisiä ongelmia ovat muun muassa huono energiatehokkuus, vesikattojen ja ulkoseinien huono kunto, hissien puuttuminen sekä kerrostalojen ulkoasun visuaalinen köyhyys. (Tolppanen 2013) Lähiöitä on korjattu jo aiemminkin, mutta korjaukset ovat olleet pääasiassa kosmeettisia ja tämän vuoksi tulevaisuuden rakentamisessa lähiöiden korjaaminen on merkittävässä roolissa.

Tällä hetkellä asuinkerrostalojen korjaamisessa hyödynnetään uudisrakentamisen menetelmiä, eikä lähiöiden korjausrakentamiseen ole syntynyt teollisia korjausrakentamisen palvelukonsepteja. Lähiöiden tehokkaaseen korjaamiseen tällaisia kuitenkin tarvitaan. Tämä diplomityö tehdään osana kansallista KLIKK-hanketta (Lähiöiden käyttäjä- ja liiketoiminatalähtöinen korjauskonsepti), jossa tavoitteena on kehittää Suomen lähiöiden korjausrakentamisen menetelmiä. Vuoden 2012 tammikuussa alkaneen ja vuoden 2014 joulukuussa päättyvän KLIKK-hankkeen päätavoitteena on kehittää käyttäjälähtöinen, teollinen, kokonaistaloudellinen sekä tehokas korjauskonsepti lähiökerrostalojen korjaamiseen ja laajentamiseen. Hankkeessa on tarkoituksena kehittää niin sanottu All inclusive-korjauskonsepti, jossa käyttäjälle voidaan tarjota valmis malli täydennysrakentamiseen, lisäkerrosten rakentamiseen sekä ulkoseinien tehokkaaseen energiakorjaukseen ja uusimiseen. KLIKK-hankkeessa on tarkoitus hyödyntää huhtikuussa 2011 voimaantulleita uusia palomääräyksiä, jotka sallivat kerrostalojen ulkoseinien korjaamisen ja lisälämmöneristämisen käyttäen keveitä puurunkoisia ja -julkisivuisia rakenteita.

Hankkeessa on mukana yliopistoja, kaupunkeja sekä eri alojen yrityksiä ja hankkeen koordinaattorina toimii Oulun yliopisto. Rahoitus hankkeeseen tulee mukana olevilta osakkailta sekä innovaatio- ja tutkimuskeskus Tekesiltä.

## 1.2 Tavoitteet ja rajaukset

Tämän diplomityön tavoitteena oli löytää laskennallisesti lämpö- ja kosteusteknisesti toimivia puisia, CLT- ja TES-rakenteisia seinärakennerratkaisuja lähiökerrostalojen korjaus- ja täydennysrakentamiseen. Tavoitteena oli laskennallisen mallintamisen tulosten perusteella antaa suosituksia lämpö- ja kosteusteknisesti turvallisten suurelementtien ja tilaelementtien seinärakennerratkaisujen valintaan. Työssä tutkittiin rakenteita, joita on suunniteltu KLIKK-hankkeen yhteydessä tehdyissä lähiöiden korjaussuunnitelmissa tai pilottikohteiden suunnitelmissa. Tutkimuksessa tehdyissä laskennoissa rakenteita tarkasteltiin Suomen ilmasto-olosuhteissa ottaen huomioon ilmastomuutoksen aiheuttamat vaikutukset. Tutkimuksen lopputuloksista koottiin tiedot toimivista lähiökerrostalojen korjausrakentamisen puurakennerratkaisuista KLIKK-hankkeessa tehtyyn kirjaan.

Tässä tutkimuksessa rakenteiden toimintakriteereiksi valittiin homeen kasvu rakenteessa sekä kosteuden kondensoituminen rakenteeseen. Homeen kasvun tutkimiseen käytettiin VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämää parannettua homemallia, jonka avulla voidaan tarkastella homeen määrää materiaalin pinnalla ja arvioida homeen kasvun todennäköisyyttä rakenteen eri kohdissa. Tutkimuksessa oletettiin, että rakenteet ovat ehjiä ja toimivat suunnitellulla tavalla. Laskennassa ei otettu huomioon rakennusvirheiden aiheuttamaa vaikutusta rakenteiden toimivuuteen, vaan oletettiin, että rakenteet ovat ilmatiiviitä eikä vuotoilmavirtojen kuljettama kosteus vaikuta rakenteen kosteuteen. Koska tutkittavat rakenteet koostuivat TES- ja CLT-elementeistä, voitiin olettaa, että rakenteet kokoonpannaan sisätiloissa eikä rakenteiden sisään synny ylimääristä kosteuslisää rakennusaikana.

Laskennassa otettiin huomioon viistosateen, auringonsäteilyn sekä tuuletusraon vaikutus rakenteessa vallitseviin olosuhteisiin. Sisä- ja ulkoilman olosuhteiksi valittiin rakenteiden kosteusteknisien toiminnan kannalta kriittiset olosuhteet, joita kuvattiin erilaisten testivuosien avulla. Tässä tutkimuksessa testivuosina käytettiin TTY:llä tehdyn FRAME-tutkimuksen (Future Envelope Assemblies and HVAC Solutions) (2013) yhteydessä määritettyjä nykyilmaston ja tulevaisuuden ilmaston testivuosia. Vähän sadetta imevillä julkisivupinnoilla, kuten puuverhotuilla pinnoilla, mitoittavina vuosina käytettiin Jokioisen testivuosia. Tiilijulkisivuilla testivuosina käytettiin Vantaan testivuosia, koska ne ovat runsaan viistosateen ja auringonsäteilyn vuoksi kriittisempiä tiilijulkisivujen toiminnalle. (Vinha et al. 2013)

Tutkimuksen tuloksia verrattiin aiemmin tehtyihin tutkimuksiin. Pääasiassa vertailussa keskityttiin TTY:llä tehdyn FRAME-projektin tuloksiin. FRAME-projektissa tutkittiin vuosina 2009–2012 vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa ja toiminnan muutoksia ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutuksesta Suomen ilmastossa. Tässä diplomityössä rakenteiden toimintaa tutkittiin TTY:llä pit-



kään kehitetyn rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmän mukaisesti, jolla voidaan tarkastella rakenteiden kosteusriskejä nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa (Vinha et al. 2013). Tämä tutkimus rajattiin koskemaan lähiökerrostaloja, jotka ovat lämpimiä asuinrakennuksia. Aihe rajattiin myös koskemaan suomalaista rakennustapaa, ja ilmastodata, jota rakenteiden mallinnukseen käytettiin, koskee Suomen ilmastoa.

### 1.3 Tutkimuksen suoritus

Tässä tutkimuksessa selvitettiin laskennallisesti KLIKK-hankkeessa jo käytettyjen tai suunniteltujen rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Laskennassa käytettiin epästationääristä lämpö- ja kosteuslaskentaohjelmaa, joka tässä työssä oli saksalainen Delphin 5.8.1 -laskentaohjelma. Delphin 5.8.1 on simulointiohjelma yhdistetylle lämmön ja kosteuden siirtymiselle huokoisissa materiaaleissa.

Rakenteita tutkittiin monissa eri laskennallisissa olosuhteissa ja rakenteiden ominaisuuksia varioitiin laskentatarkasteluissa eri tavoin. Tutkimukset tehtiin ainoastaan laskennallisesti eikä diplomityön laskentatutkimuksissa ollut mukana lainkaan todellisia kohteita. Tutkimusmenetelmänä käytettiin myös kirjallisuusanalyysiä. Kirjallisuusanalyysin avulla selvitettiin rakenteiden perusominaisuuksia ja käytiin läpi aihepiirin taustateoria sekä rakenteisiin vaikuttavien rakennusfysikaalisten ilmiöiden perusteita. CLT- ja TES-elementteihin perehdyttiin valmistajien omien manuaalien ja lähdemateriaalien puitteissa. Kyseisten elementtien perusominaisuudet selvitettiin elementtivalmistajien manuaalien pohjalta sekä elementeistä tehtyjen aiempien tutkimusten perusteella. Kirjallisuusanalyysin avulla varmistettiin aihepiirin teoreettinen osaaminen ja lähteinä käytettiin monipuolisesti sekä suomalaisia että kansainvälisiä rakennusfysiikan ja puu- sekä korjausrakentamisen lähteitä.

Kaikki tutkimuksessa mukana olleet rakenteet mallinnettiin ensimmäisen kerran alkuperäisen mallin mukaan. Jos havaittiin, että rakenne ei ollut lämpö- ja kosteusteknisiltä ominaisuuksiltaan riittävä, rakennetta muokattiin siten, että asetetut raja-arvot täyttyivät. Laskelmista kerättiin erilaisia tuloksia, joiden avulla voitiin laskea homeindeksin arvot eri ajanhetkillä eri kohdissa rakennetta ja arvioida kosteuden kondensoitumista rakenteisiin. Diplomityössä tutkittiin noin kymmentä erilaista seinärakennetta sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastossa. Rakenteiden pintaverhousmateriaaleina oli mukana puuverhouksia, tiiliverhous sekä rappauslevyllä toteutettu rapattu julkisivuverhous.

### 1.4 Tutkimuksen rakenne

Työn kirjallisuusosiossa käydään läpi aiempia tutkimuksia liittyen työssä tutkittaviin puuelementteihin, lähiökerrostaloihin ja puukerrostaloihin. Työn teoriaosuudessa

käydään läpi ulkoseinärakenteiden lämpö- ja kosteusteknisiin ominaisuuksiin vaikuttavat rakennusfysikaaliset ilmiöt sekä lyhyesti tämänhetkiset ohjeet ja määräykset rakenteiden kosteus- ja lämpöteknisestä toiminnasta. Laskentaosiossa tehdään yhteenveto työssä tehdyistä laskelmista.

Tutkimuksen toisessa kappaleessa kerrotaan yleisesti KLIKK-hankkeesta ja sen tavoitteista sekä suomalaisista kerrostaloista ja lyhyesti niiden korjaamisesta puuelementeillä. Kolmas kappale käsittelee puuelementtejä kerrostalojen korjaamisessa: mitä mahdollisuuksia niillä on ja mitkä ovat niiden perusominaisuudet ja mahdolliset käyttökohteet. Luvussa keskitytään CLT- ja TES-rakenteisiin puuelementteihin. Neljännessä kappaleessa käydään läpi teoriaa seinärakenteissa tapahtuvista kosteuden ja lämmön siirtymisen ilmiöistä sekä seinärakenteisiin vaikuttavista kosteusrasituksista. Tämän jälkeen, kappaleessa 5, kerrotaan materiaalien mikrobivaurioista sekä homeh-  
tumisriskin arvioinnista VTT:n ja TTY:n kehittämän parannetun homemallin avulla.

Kappale 6 käsittelee rakennusfysikaalisen laskennallisen tarkastelun perusteita. Kuudennessa kappaleessa kerrotaan myös tässä tutkimuksessa käytettävistä rakenteiden toimintakriteereistä sekä esitellään lyhyesti ohjeita ja määräyksiä, joita Suomessa on annettu rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä toiminnasta. Kappale 7 käsittelee tämän tutkimuksen rakennusfysikaalisten laskentatarkastelujen suorittamista. Kahdeksannessa kappaleessa esitetään tarkastellut rakenteen ja laskennasta saadut tulokset. Luvussa 9 tehdään tulosten tarkastelu sekä virhearviointi. Kymmenennessä kappaleessa tehdään tutkimuksen yhteenveto ja kootaan johtopäätökset.

## 2 TUTKIMUKSEN TAUSTA

Tässä kappaleessa käydään läpi KLIKK-hankkeen idea ja tavoitteet. Kappaleessa tarkastellaan myös lyhyesti kerrostalojen rakentamista Suomessa ja kerrostalojen rungon perusrakenteita. Toisen kappaleen loppupuolella, kappaleessa 2.3, kerrotaan lyhyesti kerrostalon julkisivukorjauksesta puuelementeillä Suomessa. Kappaleessa 2.4 käsitellään lyhyesti FRAME-tutkimuksessa saatuja tuloksia rankarakenteisten seinien toimivuudesta mitoittavissa Suomen ilmasto-olosuhteissa.

### 2.1 KLIKK-hanke

Suomeen on rakennettu 1960- ja 1970-luvulla runsaasti lähiökerrostaloja. Kerrostaloja rakennettiin paljon ja nopeasti 60-luvun akuutin asuntopulan vuoksi, eikä rakentamisen laatu ja rakennusten energiatehokkuus ollut huipussaan edes sen ajan näkökulmasta katsottuna. Tyypillisin tuon aikakauden kerrostalo on toteutettu betonielementtirunkoisena talona, jonka julkisivut on tehty paloa levittämättömistä materiaaleista, kuten betonista. Kuvassa 2.1 on esitetty esimerkkinä Riihimäen Peltosaarella sijaitseva lähiökerrostalo ja korttelin pihapiiri alkuperäisessä kunnossaan (Tulamo 2010).



**Kuva 2.1** Riihimäen Peltosaarella sijaitseva lähiökerrostalo. (Lähde: Tulamo 2010, Diplomityö)

Lähiökerrostaloissa korjaustarvetta aiheuttavat muun muassa korroosion aiheuttama julkisivurakenteiden rapautuminen ja parvekerakenteiden rapistuminen, joista saattaa aiheutua jopa turvallisuusriskejä (Puuinfo 2010). Kerrostaloissa on muun muassa ansaiden ja kiinnikkeiden kestävyysongelmia, rakenteiden kosteusvaurioita ja läm-

möneristysten puutteita. Tämän takia lähitulevaisuudessa rakentamisessa pitäisi keskittyä uudisrakentamisen sijaan yhä enemmän lähiöiden korjausrakentamiseen. Uudisrakentaminen vaikuttaa hitaasti Suomen rakennuskannan energiatehokkuuden paranemiseen ja sen takia jo olemassa olevien rakennusten energiatehokkuutta onkin tärkeää parantaa. Suomen rakennuskannan energiatehottomin osa on tällä hetkellä juuri 60- ja 70-luvulla rakennetut kerrostalot. Niiden vaipparakenteiden lämmöneristävyyden on huono, vanhat lämmitysjärjestelmät eivät ole energiatehokkaita ja ilmanvaihtojärjestelmänä on tyypillisesti koneellinen poistoilmanvaihto, jonka aiheuttama lämpöhäviö on kerrostaloissa merkittävä. Myös ikkunoiden ja ovien tiivisteet ovat monesti puutteellisia. Siksi juuri lähiökerrostalojen energiankulutusta vähentämällä voitaisiin vaikuttaa merkittävästi Suomen rakennuskannan energiankulutukseen. Merkittäviä energiatehokkuuteen vaikuttavia korjauksia ovat yläpohjien ja ulkoseini- en ulkopuolinen lisälämmöneristäminen, ilmatiiviyn parantaminen ja ikkunoiden ja ovien vaihtaminen nykypäivän standardien mukaisiksi. Myös lämmöntuottolaitteistojen uusiminen ja lämmön talteenotolla varustetun tulo- ja poistoilmanvaihdon asentaminen toisi säästöjä energiankulutukseen. (Soikkeli 2011)

Lähiökerrostaloja korjattaessa tulisi samanaikaisesti kiinnittää huomiota myös rakennusten ulkonäön ja asumisviihtyvyyden parantamiseen, niin sanottuun laadulliseen korjaamiseen. Lähiöiden miljööstä tulisi muuttua saneerauksessa ihmisläheisemmäksi ja elävämmäksi, jotta niiden houkuttelevuus asumismuotona säilyisi. Lähiöiden maine on huono verrattuna niiden tarjoamiin mahdollisuuksiin ja lähiöistä olisikin mahdollista kehittää houkuttelevia ja energiatehokkaita asuin ympäristöjä. (Soikkeli 2011) Kuvassa 2.2 on Tomi Tulamon (2010) suunnittelema havainnekuva siitä, miltä yllä esitetty Riihimäen Peltosaarella sijaitseva lähiökerrostalo ja sen ympäristö voisivat näyttää energiakorjauksen ja täydennysrakentamisen jälkeen. Kuvassa 2.2 oleva kerrostalo on suunniteltu korjattavan puisilla julkisivuelementeillä ja puisilla tilaelementeillä.



**Kuva 2.2** Riihimäen Peltosaarella sijaitsevan lähiökerrostalon havainnekuva korjauksen jälkeen. (Lähde: Tulamo 2010, Diplomityö)

Väestön ikääntyessä myös rakennusten käytön esteettömyydellä on suuri merkitys. Esimerkiksi hissittömyys on ongelmana monissa Suomen kerrostaloissa. Suomessa oli vuoden 2008 lopussa 1 219 000 kerrostaloasuntoa ja kolmasosa Suomen väestöstä asui kerrostaloissa. Kerrostaloista yli kolmekerroksisia oli 21 000 ja niistä hissittömiä 3300. Näissä hissittömissä kerrostaloissa oli asuntoja yhteensä 109 000 ja asukkaita 148 000. Asukkaista 65 vuotta täyttäneitä oli 24 000. Kolmekerroksisten talojen hissittömyys oli vielä yleisempää. Hissittömissä kolmekerroksisissa taloissa asui vuoden 2008 lopulla melkein puoli miljoonaa ihmistä ja näistä 65 vuotta täyttäneitä oli 72 000. Vuoden 2008 lopussa Suomessa hissittömissä kolme tai yli kolmekerroksisissa taloissa asui siis yhteensä 96 000 yli 65 vuotta täyttänyttä. (Suomen virallinen tilasto 2008) Suuri osa ikääntyneistä haluaa kuitenkin asua omassa asunnossaan, jolloin palvelujen tarve ja asuntojen esteettömyys nykyisissä kerrostaloissa vaikuttavat ratkaisevasti ikääntyvien kotona selviytymiseen.

Vuoden 2012 tammikuussa alkaneen kansallisen KLIKK-hankkeen tavoitteena onkin löytää vastaus siihen ongelmaan, miten lähiöiden saneerausta energia- ja ekotehokkaiksi sekä elävimmiksi voitaisiin nopeuttaa. KLIKK-hanke on kolmivuotinen hanke, joka kuuluu Tekesin Rakennettu ympäristö -ohjelmaan. Hankkeen keskeisenä tavoitteena on kehittää käyttäjä- ja liiketoimintalähtöinen korjauskonsepti lähiökerrostalojen kunnostamista varten. Vuonna 2011 huhtikuussa voimaantulleet uudet pölmääräykset (RakMK 2011) muuttivat lähiökerrostalojen korjausmahdollisuuksia oleellisesti. Puun käyttö korjaamisessa helpottui ja uudet määräykset mahdollistavat tietyin edellytyksin muun muassa keveiden puurakenteisten lisäkerrosten rakentamisen kerrostaloihin ja ulkoseinien korjaamisen käyttäen puisia seinäelementtejä ja ulkoverhouksia. (Puuinfo 2013) Käyttäjälähtöisyydellä tarkoitetaan KLIKK-hankkeessa isännöitsijöiden ja taloyhtiöiden kannalta sitä, että kaikki tieto on saatavilla helposti yhdeltä taholta. Yhdeltä toimijataholta on tarkoitus saada hankkeen toteutussuunnittelu, kustannusarviot sekä toteutus, jotka pohjautuvat yhdessä etukäteen laaditulle ja sovitulle hankekuvaukselle. Asukkaiden kannalta käyttäjälähtöisyys tarkoittaa nopeaa ja häiriötöntä työmaavaihetta. (Puuinfo 2013) Taloyhtiöille korjausurakassa tärkeää on myös hankkeen kustannusrakenne. Lisäkerroksen tai -kerrosten rakentaminen voi olla monelle taloyhtiölle tärkeä keino rahoittaa välttämättömät korjaukset, kuten julkisivu- ja parvekekorjaukset ja hissien rakentaminen tai korjaaminen. (Soikkeli 2011)

Lähiöissä tehtävää korjausurakkaa ei ole helppoa suorittaa uudisrakentamisen periaatteilla vaan rakentamiseen tarvitaan teollinen korjausrakentamisen palvelukonsepti. Teollisen rakentamisen avulla voidaan tehostaa lähiöiden korjaamista, joka nykyisellään on hidasta. Hitautta korjaamiseen syntyy, kun hankkeissa joudutaan käyttämään useita eri urakoitsijoita, jolloin töiden yhteensovittaminen voi olla vaikeaa. Ongelma teollisen rakentamisen mukaantuomisessa on kuitenkin siinä, että lähiökerrostalot ovat niin monimuotoisia, että yleispätevän korjausratkaisun toteuttaminen kaikille

taloille on mahdotonta. KLIKK-hankkeessa onkin tarkoituksena kehittää niin sanottu All inclusive-korjauskonsepti, jossa käyttäjälle voidaan tarjota valmis malli täydennysrakentamiseen, lisäkerrosten rakentamiseen sekä ulkoseinien tehokkaaseen energiakorjaukseen ja uusimiseen. (Puuinfo 2013)

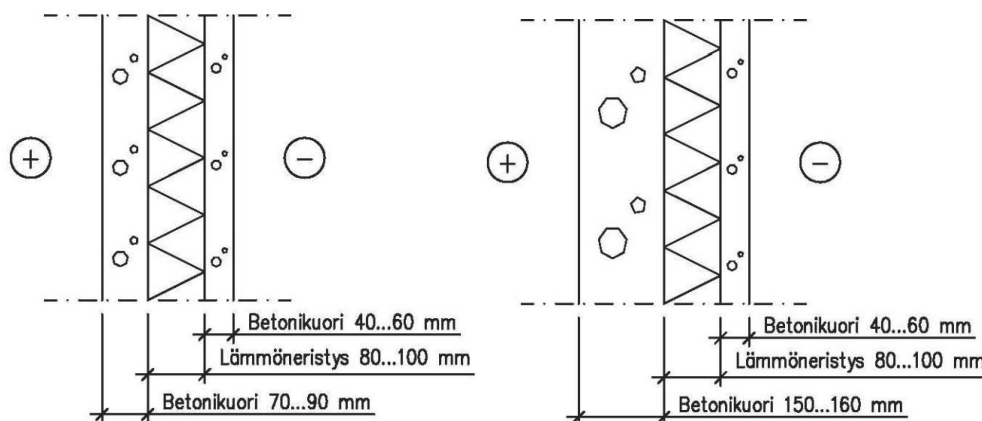
Hankkeessa tutkitaan keveiden puurunkoisten seinäelementtien käyttöä julkisivukorjauksissa sekä valmiiden puisten tilaelementtien käyttöä lisäkerrosten rakentamisessa. Tilaelementeillä lisätilaa on helppo rakentaa, koska ne voivat olla sisältä ja ulkoa täysin valmiita ja niiden pinta-ala voi olla jopa 60 m<sup>2</sup>. Myös seiniä on helppo korjata valmiilla puuelementeillä, koska kevytrakenteisina elementit voivat olla useamman kerroksen korkuisia ja niihin voidaan asentaa talotekniikka jo valmiiksi elementtien sisään. Näin ollen elementeillä voidaan parantaa energiatehokkuutta, ilmanvaihtoa ja lämmöntalteenottoa samalla kertaa. Aiemmin on jo tutkittu Suomessa ja muualla Euroopassa TES-järjestelmää, joka on tarkoitettu julkisivukorjauksiin. Suomessa TES-elementtejä on käytetty kahdessa kohteessa ja niissä suurelementtien käytöstä on saatu hyviä kokemuksia. KLIKK-hankkeessa on tarkoitus käyttää myös hieman TES-elementtejä vastaavaa toista puista seinäelementtiä, jonka runko on tehty CLT-levystä. (Puuinfo 2013) KLIKK-hankkeessa on tarkoitus tuottaa Lähiöiden käyttäjä- ja liiketoimintalähtöisen korjauskonseptin ohessa yhteistyöyritysten kanssa mallikirja taloyhtiöille korjaushankkeiden käynnistämiseen. Mallikirjassa on tarkoitus antaa työkaluja käyttäjälähtöiseen ideointiin ja suunnitteluun.

## 2.2 Kerrostalojen rakentaminen Suomessa

Suomessa oli vuoden 2008 lopussa 2 768 000 asuntoa, joista kerrostaloasuntoja oli lähes puolet, 1 219 000 asuntoa. (Suomen virallinen tilasto 2008) Suomessa kerrostalot jaotellaan kantavan rungon perusteella paikalla rakennettuihin, elementtirakenteisiin tai näiden välimuotoa oleviin runkoihin. Kerrostalojen rakentaminen Suomessa alkoi lisääntyä 1880-luvulla, jolloin alkoi kerrostalojen muuraus paikalla tiilestä. 1900-luvun vaihteeseen asti kerrostalojen rakennusratkaisut pysyivät pitkälti samanaikaisina. Runko rakennettiin kahden tiilen paksuisista ulkoseinistä ja rungon keskelle rakennettiin tiilinen sydänmuuri. Jos kerrokseen haluttiin pidempi jänneväli, saatettiin rakentaa kaksoissydänmuuri. Ensimmäisissä kerrostaloissa huoneet ja huonekorkeudet olivat isoja. 1920-luvulla kuitenkin funktionalismi alkoi tulla pienissä määrissä esiin kerrostalorakentamisessa ja rakennusrunkoja alettiin yksinkertaistaa ja niiden syvyyttä pienentää. Maailmalla funktionalismin ihanteina olivat betoniset rakenteet, tasakatto, ei-kantavat julkisivut sekä nauhaikkunat. Nämä siirtyivät myös suomalaisen rakennuskulttuuriin ja 1930-luvun lopulla Suomeen rakennettiin ensimmäisiä selkeästi funktionalistisen tyylin mukaisia, kapearunkoisia lamellitaloja. 1920–1950-luvuilla oli edelleen vahvasti käytössä runkorakenteena kantava tiilimuuri. Myös kalkkiehkekatiiltä käytettiin. Sydänmuureja alettiin korvata teräsbetonipilareilla 1920-luvun alusta lähtien ja paksujen sydänmuurien käyttöä alettiin vähentää. 1930-

luvun lopulla sekarakenteisesta rungosta tuli Helsingissä perinteistä tiilirakenteista runkoa yleisempi ratkaisu. Kerrostaloja tehtiin vielä sodan jälkeen myös sekarakenteisina tiilestä, betonista ja kevytbetonista. Kantavia rakenteita haluttiin kuitenkin taloudellisuussyistä keventää ja seiniä muurattiin enää puolentoista kiven paksuisina ja materiaalina toimi paremmin lämpöä eristävä reikätiili. Ulkoseinien eristämisessä käytettiin myös uusia ratkaisuja, kuten Siporexia. 1950-luvulla teräsbetonin käyttöä alettiin lisätä kantavissa pystyrakenteissa ja 50-luvun puolivälissä teräsbetoni syrjäytti tiilen yleisimpänä kantavan rungon materiaalina. Ulkoseinät ja väliseinät alettiin tehdä betonista ja ulkoseiniä alettiin eristää ulkopuolelta. Julkisivuverhoilu tehtiin tiilestä tai esimerkiksi julkisivulevyistä. (Rakennusperintö: Kerrostalojen perusrakenteet ja talotekniikka 1880-luvulta nykypäivään)

1950-luvulla teknologia oli kehittynyt riittävästi betonielementtien teollista tuotantoa varten, mutta vasta 60-luvun alussa kasvanut asuntokysyntä aloitti elementtitehtaisiin investoinnit. Vuonna 1957 rakennettiin Suomeen ensimmäinen elementtirakenteinen asuinkerrostalo. Ulkoseinät olivat betonisia sandwich-elementtejä, joissa kahden betonisen kuoren välissä on lämmöneriste. Betonisandwich-elementin sisäkuori voi olla kantava tai ei-kantava. Kuvassa 2.3 on esitettynä tyypilliset 1960–70-lukujen ei-kantavan ja kantavan betonisandwich-elementin rakenneleikkaukset. (Rakennusperintö: Kerrostalojen perusrakenteet ja talotekniikka 1880-luvulta nykypäivään)



**Kuva 2.3** Vasemmalla tyypillinen 1960–70-luvun ei-kantavan betonisandwich-elementin rakenneleikkaus ja oikealla tyypillisen kantavan betonisandwich-elementin rakenneleikkaus.

1950-luvun lopulla lähiöiden rakentaminen alkoi tehostua. Asuntoja tarvittiin paljon ja nopeasti. Rakennusosia standardoitiin ja elementtirakentaminen aloitettiin tosisaan. Elementtirakentamisen myötä kehittyi niin sanottu kirjahyllyrunko, jossa poikkittaiset väliseinät ja porrashuoneet ovat paikalla rakennettuja kantavia rakenteita ja pitkän sivun elementtirakenteiset julkisivut on kiinnitetty kantaviin väliseiniin. Suurin osa Suomessa rakennetuista 1960-luvun kerrostaloista on rakennettu kirjahyllyrunkoisina. Kirjahyllyrunkoisia kerrostaloja tehtiin myös täysin elementtirakenteisina, jolloin myös väliseinä- ja välipohjaelementit olivat massiivibetonielementtejä.



Kirjahyllyrunkoisissa kerrostaloissa väliseiniä oli tiheässä ja asunnot olivat sokkeloisia ja huoneet pieniä. 1970-luvulla julkistettiin Betonielementtistandardi -järjestelmä (BES), jossa välipohjat rakennettiin ontelolaatoista tai kotelolaatoista, jotka mahdollistivat huomattavasti pidemmät jännevälit. Näin väliseinien määrää pystyttiin vähentämään ja huonekokoja kasvattamaan. Vuodesta 1975 lähtien yleisin kerrostalotyyppi on ollut BES-täyselementtikerrostalo, jossa ulkoseinänä käytetään betonisandwich-elementtiä. Betonisandwich-elementtejä on saatavilla monin tavoin pintakäsiteltynä. Elementtirakentamisen tekniikat kehittyivät 1980-luvulla ja ikkunoita ruvettiin sijoittamaan vapaammin elementteihin ja elementtien saumajako voitiin sijoittaa paremmin arkkitehtuurin mukaan. Seinätyypit ovat myös kehittyneet nykypäivään tultaessa ja elementtitaloihin onkin yhdistetty ulkopinnaltaan rapattuja tai puhtaaksi muurattuja julkisivuja, jolloin sisäkuorena on käytössä joko betonielementti tai rankaseinä. 2010-luvulla asetetut uudet energiamääräykset ovat aiheuttaneet jälleen muutoksia kerrostalojen ulkoseinärakenteisiin lisääntyvien lämmöneristemäärien vuoksi. (Rakennusperintö: Kerrostalojen perusrakenteet ja talotekniikka 1880-luvulta nykypäivään)

## **2.3 Kerrostalojen julkisivukorjaus**

Kerrostaloihin tehtävät julkisivukorjaukset perustuvat kerrostaloista tehtäviin kuntoarvioihin ja kuntotutkimuksiin. Kerrostalon ulkokuoren kunnon heiketessä korjausvaihtoehtoja ovat esimerkiksi julkisivun paikkauskorjaus tai vaihtoehtoisesti julkisivun käyttäminen loppuun, jonka jälkeen laaja peruskorjaus on välttämätön. Julkisivun peruskorjauksessa julkisivun pintakerros puretaan ja julkisivu rakennetaan paikalla uudestaan lämmöneristyskerroksesta ulospäin. Rakennuksen ulkovaipan lisälämmöneristäminen on myös korjausvaihtoehto, joka voidaan toteuttaa purkamalla vanha ulkokuori tai kiinnittämällä lisäeristys vanhan ulkokuoren päälle. (Nieminen et al. 2013) Tehokkain energiaa säästävää korjaustoimenpide on rakennuksen vaipan lämmöneristysparantaminen. Uutena korjausmenetelmänä Suomessa on tässä tutkimuksessa käsiteltävä julkisivujen korjaaminen puisilla julkisivuelementeillä.

### **2.3.1 Kerrostalojen julkisivukorjaus puuelementeillä Suomessa**

Kerrostalojen puuelementeillä tehtävien julkisivukorjausten ja täydennysrakentamisen pilottihankkeita on Suomessa jo aloitettu ja kohteita on myös valmistunut. Hankkeissa on tavoitteena rakennuksen ulkovaipan ja ilmanvaihdon korjausten ja muutosten avulla parantaa rakennusten energiankulutusta ja mahdollisesti saavuttaa passiivitalon energiankulutus. Kerrostalojen puuelementeillä tehtäviä korjauksia on tehty muun muassa Raahen Kummatin lähiössä sekä Riihimäen Peltosaaressa sijaitsevassa lähiössä. Passiivikorjaus esivalmistetuilla julkisivuelementeillä on toteutettu Riihimäellä Innova-projektissa. Riihimäen Peltosaaren alueella olevaan kerrostaloon aloitettiin korjaussuunnittelu vuoden 2010 lopussa ja rakennustyöt kohteessa aloitettiin elokuussa 2011. Kohde on valmistunut vuoden 2012 joulukuussa. Normaalista ker-



rostalokorjauksesta poiketen Innova-projektissa suurin osa julkisivuremontin töistä on pyritty tekemään työmaan ulkopuolella ja julkisivuelementit on tuotu elementtitehtaalta työmaalle vasta juuri ennen asennusta. (Lylykangas, Innova-projektin raportti)

Innova-projektiin valittu talo on tyypillinen 1970-luvun lähiökerrostalo. Rakennus on nelikerroksinen betonielementtitalo, jonka rakennusvuosi on 1975. Hankkeeseen valittu Riihimäen Kotikulma Oy:n talo 10 on esitettynä kuvassa 2.4 alkuperäisessä asussaan.



**Kuva 2.4** Innova-projektiin valittu Riihimäen Kotikulma Oy: talo 10 Riihimäen Peltoasaassa alkuperäisessä kunnossa. (Lähde: Innova-projektin www-sivut)

Riihimäen kerrostalon korjaamiseen on käytetty TES-menetelmää. Ennen vanhojen elementtien purkamista rakennuksen ulkopinta on mitattu laserkeilauksella, jonka perusteella rakennuksesta on tehty 3D-malli. 3D-mallin avulla rakennukseen on valmistettu mittatarkat puurunkoiset julkisivuelementit. Rakennuksen mittaamisen jälkeen betonisandwich-elementtien ulkokuori on purettu ja vanha lämmöneristys poistettu. Puretun ulkokuoren tilalle on asennettu puiset, 12 metriä korkeat, pystysuuntaiset julkisivuelementit. Elementtien kantava puurakenne on elementin reunoilla ja ikkunoiden ympärillä 39 x 300 mm kertopuuta. Puurunko on levytetty molemmin puolin vääntymisen estämiseksi ja puurungon sisäpuolelle on asennettu 9 mm paksu kuusivaneri liimaamalla ja naulaamalla. Elementin ulkopinta koostuu tuulensuojana toimivasta kuitusementtilevystä, jonka pinnalle on kiinnitetty liimaamalla kivivillapohjainen 50–100 mm paksu rappauslamelli. Parvekkeiden kohdalla rapatun julkisivun tilalla on tuuletettu puuverhous. Elementin sisäpinnalle, kuusivanerin päälle on kiinnitetty Tyvek -kalvo sekä 100 mm tasausvillaa. Eristeenä elementissä on 300 mm kivivillaa. (Lylykangas, Innova-projektin raportti)

Korjauksen yhteydessä rakennukseen on uusittu ovet, ikkunat ja parvekkeet sekä lämmöneristys. Myös rakennuksen ilmanvaihto on päivitetty korjauksen yhteydessä lämmöntalteenotolla varustettuun tulo-poisto -ilmanvaihtoon. Uudet tuloilmakanavat on asennettu julkisivuelementteihin ja poistoilma johdetaan vanhoja reittejä pitkin. (Lylykangas, Innova-projektin raportti) Kuvassa 2.5 Riihimäen Kotikulma Oy:n talo 10 on uudistettuna.



**Kuva 2.5** Riihimäen Kotikulma Oy:n talo 10 Riihimäen Peltosaarella korjauksen jälkeen. (Lähde: Innova-projektin [www-sivut](#))

Julkisivukorjauksen ja lämmitysjärjestelmän päivityksen tavoitteeksi on asetettu passiivitalon kriteerit. Lämmitysenergiantarpeeksi on asetettu siis alle 25 kWh / m<sup>2</sup> a ja ilmanpitävyyden tavoitearvoksi on valittu ilmanvuotoluvun arvo  $n_{50} \leq 0,6$  1/h. VTT:n tekemän ilmatiiveysmittauksen tulos rakennustyön valmistuttua on  $n_{50} = 0,8$  1/h. VTT:n tekemän simulaation mukaan kohteen rakenteiden U-arvot ovat parantuneet huomattavasti. Esimerkiksi kantavan ulkoseinän U-arvo on pudonnut tasolta 0,27 W/(m<sup>2</sup>K) tasolle 0,1 W/(m<sup>2</sup>K). (Innova-projektin [www-sivut](#)) Vaikka seinärakenne toteutettaisiin kosteusteknisesti turvallisella tuulettuvalla levyrappauksella, ei tällä ole rakenteen U-arvoon merkittävää vaikutusta.

Vaikka eristerapattu puuelementti korjausratkaisuna olisikin energiatehokas kerrostalojen julkisivujen korjaamiseen, on eristerapattu tuulettumaton puurunkoinen rakenne havaittu aiemmissa tutkimuksissa kosteusteknisesti riskialttiiksi (Vinha et al. 2013). FRAME-tutkimuksessa todetaan eristerapatuista puurunkoisista seinistä, että niiden rakenteen ulko-osan homehtumisriski on suuri kalkkisementtirappauksella toteutettuna ja tällaista rakennetta ei tulisi käyttää. Sementtisideaineisilla ohutrappauslaasteilla pinta pidättää paremmin sadetta, mutta rakenteen kuivuminen muodostuu ongelmaksi tilanteissa, jossa rakenteeseen on päässyt vettä kosteusvuodon seurauksena. Rakenteen sisään saattaa kulkeutua kosteutta myös mahdollisten epätiiviyden

liitosten tai halkeamien kautta. Eristerappauksen käyttö ei siis ole suositeltavaa suoraan puurunko- tai kipsilevyseinässä. Kosteusteknisesti turvallisemmaksi ratkaisuksi on FRAME-tutkimuksessa todettu levyrappaus tuulettuvana julkisivurakenteena. Tuulettuvassa ratkaisussa mahdollinen rakenteessa oleva ylimääräinen kosteus pääsee poistumaan lyhyessä ajassa ja ulkoverhous suojaa seinän sisempiä osia kastumiselta. (Vinha et al. 2013) Ruotsissa on havaittu runsaasti homeongelmia tuulettumattomissa eristerapatuissa puurunkoisissa seinissä.

## **2.4 FRAME-projektin tulokset rankarakenteisten seinien toimivuudesta**

Rankarakenteisten seinien kosteusteknistä toimivuutta on tutkittu laajasti sekä Suomessa että ulkomailla. Merkittävä Suomessa tehty tutkimus vaipparakenteiden kosteusteknisestä toiminnasta on tehty Tampereen teknillisellä yliopistolla vuosina 2009–2012 toteutetussa FRAME-projektissa. FRAME-projektissa on tutkittu ilmastomuutoksen ja lämmönerityksen lisäyksen vaikutuksia vaipparakenteiden kosteustekniseen toimintaan ja rakennusten energiankulutukseen Suomessa. Tutkimuksessa on selvitetty myös, millä rakenteellisilla muutoksilla tai teknisillä ratkaisuilla rakenteiden kosteusteknistä toimintaa voitaisiin parantaa. TTY:llä on kehitetty rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmä, jonka avulla voidaan tarkastella luotetavammin rakenteissa ilmeneviä kosteusriskejä nyky- ja tulevaisuuden ilmastoissa. FRAME-tutkimuksen yhteydessä analysointimenetelmää täydennettiin ulkoilman olosuhteiden testivuosien valinnan ja toimintakriteerien raja-arvojen osalta. Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmässä otetaan huomioon sisä- ja ulkoilman olosuhteet, rakenteiden materiaaliominaisuudet, laskentaohjelmien ominaisuudet, rakenteiden toimintakriteerit ja tarkasteluperiaatteet. (Vinha et al. 2013)

FRAME-projektin (Vinha et al. 2013) tuloksissa todetaan muun muassa, että ilmastomuutos ja uusien energiamääräysten mukainen lämmöneristyksen lisääminen rakenteisiin heikentävät monien nykyisillä menetelmillä toteutettujen vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa ja vikasietoisuutta. Lämmöneristyksen lisääminen aiheuttaa sen, että lämmön siirtyminen vaipparakenteiden läpi heikkenee, jolloin rakenteen ulko-osissa lämpötila laskee ja suhteellinen kosteus nousee. Tämä taas saa aikaan sen, että homeen kasvun edellytykset paranevat ja kosteuden kondensoituminen lisääntyy rakenteen ulko-osissa. Tällöin sisältä tuleva lämpö ei pysty myöskään kuivattamaan rakenteita yhtä tehokkaasti kuin pienemmillä eristemäärillä. FRAME-projektin tuloksissa kuitenkin todetaan, että lähes kaikista vaipparakenteista on mahdollista saada toimivia myös tulevaisuudessa rakenteellisten muutosten ja toteutusohjeiden muutoksien avulla. FRAME-projektin mukaan puurakenteiden kosteusteknistä toimintaa voidaan parantaa lisäämällä lämmöneristystä kantavien rakenteiden ulkopuolelle. Korkeaan tiiliverhottuun puurunkoiseen ulkoseinään (>10 m) tulee puurakenteen ja tiiliverhouksen väliin laittaa kummaltakin puolelta tuuletettu diffuusiotii-

vis eli vesihöyrytiivis höyrynsulkukerros, joka estää kosteuden siirtymisen ulkoverhouksesta takana olevaan seinärakenteeseen. (Vinha et al. 2013)

FRAME-projektissa seinärakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa on tutkittu rakennusfysikaalisiin laskelmiin tarkoitetuilla WUFI-1D ja -2D-ohjelmilla. Rakennemalli on ollut 300 mm korkea, joka vastaa 600 mm runkotolppajaolla toteutettua ulkoseinärakennetta. Tarkastelupisteet on otettu lämmöneristeen ulko- ja sisäpinnasta sekä puurungon ulko- ja sisäpinnasta. FRAME-projektin mukaan näissä pisteissä lämpötila- ja kosteusmuutokset olivat suurimmillaan. Seinän tuuletusvälissä ilmanvaihtuvuutena on käytetty etelänpuoleisilla tiiliverhotuilla rankaseinillä 10 1/h ja pohjoispuoleisilla puu- ja levyverhotuilla seinillä 100 1/h ja 500 1/h. Puu- ja paneeliverhottujen seinien lämpökapasiteetti on pieni, jolloin ulkoverhoukseen varastoitunut energia säteilee infrapunasäteilynä taivaalle. Suurella 500 1/h ilmanvaihtuvuudella on otettu huomioon puu- ja paneeliverhouksen jäähtyminen pilvettöminä öinä. Ilmastodatana laskelmissa on käytetty FRAME-projektissa määritettyjä rakennusfysikaalisesti mitoittavia Jokioisen ja Vantaan ilmastotiedostoja. (Vinha et al. 2013)

Huonosti lämpöä eristävä tuulensuoja on todettu FRAME:n loppuraportissa kriittiseksi tulevaisuuden ilmastossa, koska tuulensuojan lämmönvastuksen ollessa pieni, nousee seinärakenteen ulko-osan suhteellinen kosteus talvella. Parantamalla tuulensuojalevyn lämmönvastusta voidaan parantaa puu- ja levyverhottujen rankarakenteisten seinien kosteusteknistä toimintaa. Korkealla tuulensuojan lämmönvastuksella pystytään nostamaan rungon ulko-osan lämpötilaa, jolloin olosuhteet muuttuvat epäedullisiksi homeen kasvulle. Tutkimuksessa todetaan, että mineraalivillatuulensuojalla lämmönvastuksen täytyy olla vähintään  $0,4 \text{ m}^2\text{K/W}$ , jotta seinärakenne toimisi hyvin kosteusteknisesti myös tulevaisuudessa. Tämän lisäksi myös seinärakenteen sisäpinnan tulee olla riittävän diffuusiotiivis. Käyttämällä puu- ja levyverhotuissa seinärakenteissa lämmöneristeen lämpimällä puolella höyrynsulkua, voidaan estää parhaiten diffuusiolla sisältä siirtyvän kosteuden aiheuttamat haitat. RIL 107:ssä (2012) tuulensuojan suositeltava lämmönvastus on kaikilla tuulensuojilla  $0,4 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Käytettäessä hygroskooppista eli kosteutta sitovaa tuulensuojaa, on mahdollista pienentää tuulensuojalta vaadittavaa lämmönvastusta. Hygroskooppisen tuulensuojan lämmönvastuksen täytyy olla yleensä vähintään  $0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$ , jotta homeen kasvua ei tapahtuisi tulevaisuudessa. Tähän riittäväksi rakenteeksi FRAME:ssa ehdotetaan esimerkiksi 12 mm huokoista puukuitulevyä. Käytettäessä hyvin vesihöyryä läpäisevää lämmöneristettä homeutumisherkän tuulensuojan, kuten kipsikartonkilevyn ulkopinnassa, rakenteen lämpötila nousee ja suhteellinen kosteus ohuessa tuulensuojalevyssä laskee. Tutkimuksen mukaan kuitenkin tuulensuojan vesihöyrynvastus on rakenteen kuivumisen kannalta tärkein ominaisuus. (Vinha et al. 2013) Pienen vesihöyrynvastuksen on todettu parantavan rakenteen kuivumiskykyä, mutta toisaalta sen on myös todettu aiheuttavan kosteuden kerääntymistä rakenteeseen syys- ja talvijak-

soilla, mikäli lämmönvastus ei ole kuitenkaan riittävä (Mäkitalo 2012). Suurin sallittava tuulensuojan vesihöyrynvastus riippuu sen lämmönvastuksesta. FRAME-tutkimuksen mukaan vesihöyrynvastuksen ollessa suurempi kuin  $1,2 \times 10^9 \text{ m}^2 \text{sPa/kg}$  ( $9 \times 10^3 \text{ s/m}$ ) heikkenee rakenteen kuivumiskyky selvästi. Suositeltava vesihöyrynvastuksen enimmäisarvo on  $0,68 \times 10^9 \text{ m}^2 \text{sPa/kg}$  ( $5 \times 10^3 \text{ s/m}$ ), jotta tuulensuojalevyn pintaan ei kerääntyisi haitallisesti sisäilmasta diffuusiolla tulevaa kosteutta (Mäkitalo 2012).

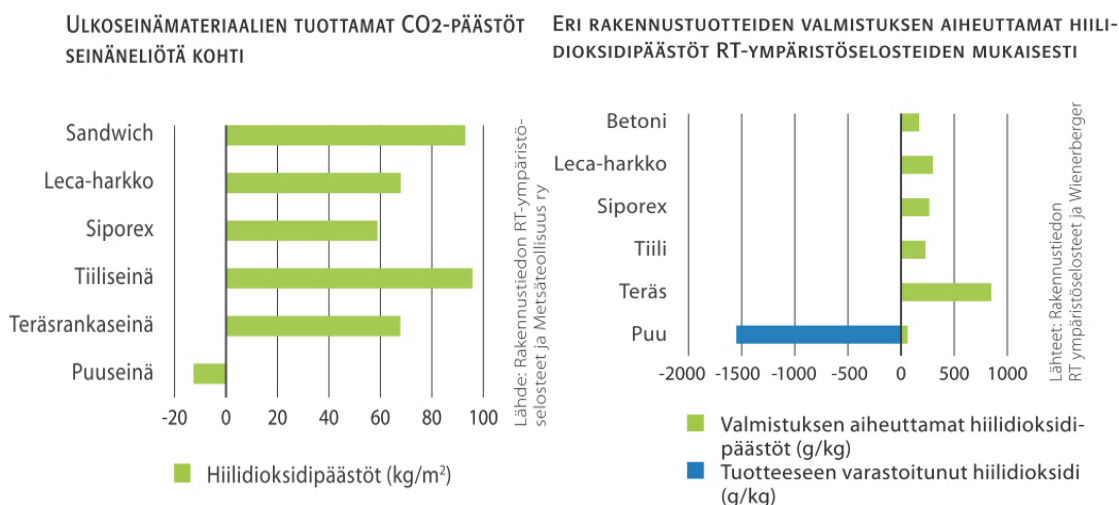
Korkeilla (>10 m) tiiliverhotuilla rankarakenteisilla seinillä kosteusteknistä toimintaa voidaan parantaa ainoastaan pienentämällä seinän sisäosaan tulevaa kosteuskuormaa. Kosteuskuormaa voidaan tutkimuksen mukaan pienentää rakentamalla julkisivun taakse kerros, joka toimii höyrynsulkuna ja on tiivis, vettä ja vesihöyryä pidättävä. Tällaista rakennetta kutsutaan niin sanotuksi sadetakkirakenteeksi. ”Sadetakkina” tiiliverhotuissa rankaseinissä voidaan käyttää esimerkiksi kuumasinkittyä ohutlevyä. Jotta rakenne on toimiva, tulee sadetakkipellin etu- ja takaosaan muodostaa päistään avoin tuuletusrako, jossa pellin ulkopuolisen tuuletusraon paksuus on yli 30 mm ja sisäpuolisen yli 20 mm. Tällainen rakenne on tutkimuksessa todettu toimivaksi, koska viistosateella tiiliverhouksen läpi tuleva kosteus pääsee poistumaan rakenteesta ulkopuolisen tuuletusvälin kautta ulkoilmaan eikä tästä syystä aiheuta lisäkosteuskuormaa seinärakenteen sisäosille. Tutkimuksessa todetaan myös, että vastaavasti kuin puu- ja levyverhotuilla rankaseinillä, pitää myös rakenteellisesti suojattujen tiiliverhottujen rankaseinien tuulensuojan lämmönvastuksen olla vähintään  $0,2 \text{ m}^2 \text{K/W}$ . (Vinha et al. 2013)

### 3 PUUELEMENTIT KERROSTALOJEN KORJAUKSESSA – CLT JA TES

Tässä kappaleessa kerrotaan puun mahdollisuuksista Suomen lähiökerrostalojen kunnostamisessa. Kappaleessa 3 käydään läpi myös puisten CLT- ja TES-elementtien perusominaisuuksia ja käyttömahdollisuuksia. Tässä yhteydessä kerrotaan myös puun ominaisuuksista, puun hyvistä ja huonoista puolista rakennusmateriaalina sekä tämänhetkisestä puuston tilasta Suomessa. Kappaleessa on esitetty myös esimerkkirakenteet sekä CLT- että TES-rakenteista julkisivuelementeistä.

#### 3.1 Puun mahdollisuudet kerrostalojen korjauksessa

Euroopassa rakentamisessa kuluu enemmän raaka-aineita kuin millään muulla teollisuudenalalla. Rakentaminen ja rakennusten purkaminen tuottavat lisäksi noin 40–50 % kaikista jätteistä. Puun osuus rakentamisessa on Suomessa noin 40 % ja koko Euroopassa noin 4 %. Puun käyttö rakentamisessa hidastaa ilmastonmuutosta, koska puu sitoo kasvaessaan hiilidioksidia ja myös puurakenteet toimivat hiilivarastoina. Hiilidioksidia puu sitoo myös silloin, kun siitä valmistetaan rakennustuotteita. Elin-kaarensa päättyessä puurakenteet voidaan kierrättää ja käyttää energianlähteenä. (Puuinfo, Puurakentaminen ja ekologinen kestävyys) Kuvassa 3.1 on esitettyä puun sitoman hiilidioksidin määrä valmiina ulkoseinänä sekä puun sitoma hiilidioksidi valmistuksessa rakennustuotteeksi.



**Kuva 3.1** Puun sitoma hiilidioksidi valmistuksen aikana ja valmiina rakennusmateriaalina. (Lähde: Metsäteollisuus ry, 2010)

Metsäteollisuus on merkittävä osa Suomen kansantaloutta. Viidennes Suomen vientituloista tulee metsäsektorilta ja työpaikan metsäsektori antaa noin 200 000 suomalaiselle. Metsät tuottavat Suomessa myös noin 70 % uusiutuvasta energiasta. Suomessa metsien kasvuvauhti on yli 100 miljoonaa m<sup>3</sup> runkopuuta vuodessa ja tästä hyödynnetään vain noin 55 %. Puun käyttöä olisi mahdollista lisätä kestävästi vielä noin 20 miljoonaa m<sup>3</sup>/vuosi esimerkiksi bioenergiälähteenä, puuteollisuudessa ja rakentamisessa. Suomessa suurin kasvupotentiaali puurakentamiselle on kerrostalorakentamisessa, julkisessa rakentamisessa, hallirakennuksissa sekä lähiökerrostalojen julkisivukorjauksissa ja lisä- ja täydennysrakentamisessa. (Puuinfo, Puurakentamisen asema ja mahdollisuudet Suomessa) Tällä hetkellä kerrostalorakentamisessa kuitenkin noin 95 % rakennetaan betonista, pientalorakentamisessa vastaava luku on 12 % ja rivitaloissa noin 40 %. (Koskela et. al. 2011).

Huhtikuussa 2011 voimaan tulleiden uusien palomääräysten myötä puun käyttäminen kerrostalorakentamisessa on helpottunut. Uudet palomääräykset sallivat enintään 8-kerroksisten puurunkoisten ja puulla verhottujen kerrostalojen rakentamisen käyttäen RakMK E1 (2011) mukaista taulukkomitoitusta. Uudet palomääräykset mahdollistavat myös keveiden puurakenteisten lisäkerrosten rakentamisen kerrostaloihin sekä rakennusten julkisivujen korjaamisen ja lisälämmöneristämisen keveillä puurunkoisilla elementeillä. Määräysten mukaan korjauskohteissa puujulkisivujen lämmöneristeiden tulee olla luokkaa A2-s1, d0. (Tolppanen et. al. 2013) Tällaisen materiaalin osallistuminen paloon on erittäin rajoitettu, sen savuntuotto on erittäin vähäistä ja palavia pisaroita tai osia ei saa esiintyä. (RakMK E1 2011) Puujulkisivun tulee täyttää pintaluokkavaatimus D-s2, d2 ja tähän luokkaan päästään esimerkiksi umpinaisella ulkoverhouslaudoituksella (Puuinfo 2010). Puujulkisivujen paloturvallisuutta on tutkittu VTT:ssä. VTT:n tekemästä tutkimuksesta on saatavilla tutkimusraportti nimeltään *'Puujulkisivujen paloturvallisuus lähiökerrostaloissa'*, jonka mukaan puun käytöllä julkisivuverhouksissa ei ole oleellista vaikutusta betonirakenteisen P1-paloluokan lähiökerrostalon paloturvallisuuteen. (Korhonen & Hietaniemi 2004)

### 3.2 Puun fysikaaliset ominaisuudet

Puu on rakennusmateriaalina lujaa, mutta puun lujuus riippuu voimakkaasti puun kuormitus suunnasta. Tämä johtuu siitä, että puu on anisotrooppista ainetta. Syysuunnassa puu kestää painoonsa nähden hyvin taivutusta, vetoa ja puristusta, mutta leikkauskestävyydeltään puu on heikompaa. Kohtisuorasti syysuuntaa vastaan puu on heikko materiaali. Puu on hauras materiaali ja puun lujuus voi vaihdella oksien ja halkeamien takia. Rakennusmateriaalina käytettävä puu lujuuslajitellaan ja siinä otetaan huomioon oksat ja kasvuviat. (RIL K161-1993, 1993) Puun lujuuteen vaikuttavat myös puun tiheys, ikä, säilytyspaikka ja se, mistä kohtaa runkoa puukappale on sahattu (Siikanen 2008). Puu lajitellaan eri luokkiin käyttötärpeen mukaisesti. Lujuuslajittelu voidaan tehdä puulle joko silmämääräisesti tai koneellisesti. Halkeamien

huomioonottaminen ei lujuuslajittelussa ole niin helppoa, koska halkeamia voi syntyä myös käytön aikana. Pääasiassa halkeamilla on vaikutusta massiivisten puupalkkien kestävyysasteeseen. (RIL K161-1993, 1993) Puun tiheys on vaihtelevaa ja se on riippuvainen puun kosteudesta ja puulajista. Puun tiheys mitataan useimmiten 15 % kosteustilassa. Suomessa yleisimmin käytössä olevien puulajien, kuusen ja männyn, tiheydet ovat 450–500 kg/m<sup>3</sup>. Rakenteissa käytettävältä puulta edellytetään tiettyjä lujuusominaisuuksia, joita ovat kimmoisuus, puristus-, taivutus- ja leikkauslujuus sekä kulutuksenkestävyys. (Siikanen 2008)

Puu on lämpötekniikalta ominaisuuksiltaan hyvin soveltuvaa rakentamiseen. Puu on huokoinen materiaali, joten se johtaa huonosti lämpöä. Esimerkiksi männyn ja kuusen lämmönjohtavuus on vain noin kahdestoistaosa betonin ja kevytbetonin lämmönjohtavuudesta. Eristävyydeltään kuitenkin esimerkiksi mineraalivilla on puuta parempaa, koska mineraalivillan lämmönjohtavuus on noin 3 kertaa pienempi kuin männyn ja kuusen lämmönjohtavuus. Puun lämmönjohtavuuteen vaikuttavat sekä puun tiheys, kosteus että suunta. Männyn lämmönjohtavuus on puun syiden suunnassa noin 0,22 W/(mK) ja syitä vastaan kohtisuoraan 0,14 W/(mK). Jos puun kosteuspitoisuus kasvaa prosentoin, puun lämmönjohtokyky kasvaa 2,7 %. Ominaislämpökapasiteetti havupuulla on 1150 kJ/(m<sup>3</sup>K) eli se on samaa luokkaa tiilen ominaislämpökapasiteetin kanssa, joka on 1260 kJ/(m<sup>3</sup>K). (Siikanen 2008)

Puun kosteustekniset ominaisuudet ovat puumateriaalin käytön kannalta sekä hyvät että huonot. Puu hygroskooppisena materiaalina pystyy sitomaan ja luovuttamaan kosteutta ilmasta, jolloin puumateriaalin avulla on mahdollista tasoittaa rakenteessa olevia kosteusrasituksia. Toisaalta taas puun kosteuseläminen on huono ominaisuus, koska se aiheuttaa puumateriaalissa muodonmuutoksia. (Kokko et al. 1999) Puun kosteuspitoisuus on riippuvainen ilman suhteellisesta kosteudesta ja ulkoisista kosteuslähteistä. Kuivuessaan puu kutistuu ja kutistuminen saa aikaan vääntymistä ja halkeamista, jotka tulee ottaa huomioon rakentamisessa. Kuivuessaan puun lujuusominaisuudet kuitenkin paranevat. Ulkona kuivatun puun kosteuspitoisuus on luokkaa 15–25 % ja jos puumateriaalin kosteuspitoisuus halutaan alle 15 %:in tulee materiaali kuivata koneellisesti. (Puuinfo, Puu materiaalina: Kosteusteknisiä ominaisuuksia)

### **3.3 Korjauskäyttöön soveltuvien puujulkisivujen rakennusratkaisut**

Toteutettaessa lähiökerrostalojen julkisivut puurakenteisina voidaan julkisivut tehdä esimerkiksi pitkistä tavarasta paikalla rakentamalla tai puurakenteisilla julkisivuelementeillä. Elementointi on järkevää, koska tällöin voidaan hyödyntää teollisen rakentamisen etuja. Puurakenteet voidaan tehdä tällöin kuivissa ja hallituissa olosuhteissa ja suurin osa työstä voidaan tehdä sisätiloissa. Tehdasolosuhteissa voidaan hyödyntää teollisen valmistamisen menetelmiä ja myös laadunvalvonta on näin helpompi toteut-



taa. Puupohjaisten elementtien kosteudenhallintaan tulee silti kiinnittää erityistä huomiota valmistuksen, kuljetuksen ja rakennustöiden aikana. (TES Energy Facade 2009) Asennusvaihe on nopeampi, kun julkisivut tehdään elementteinä eikä rakennusvaiheessa tarvitse tehdä niin paljon telinetyötä ja rakenteiden suojaamista kuin paikalla rakentamisessa. (Puuinfo 2010) Puiset julkisivuelementit voidaan toteuttaa työssä tutkittavilla ristiinliimatuilla massiivipuulementeillä – CLT-elementeillä tai TES-elementeillä, joissa on itsekantava puurunko. Tässä tutkimuksessa keskitytään elementtirakenteisten korjausratkaisujen tutkimiseen

Julkisivujen elementointiin tarvitaan tarkat mitat vanhasta julkisivusta, jotta aukot saadaan oikeille paikoilleen. Mittatarkkuus on tärkeää, koska väärillä mitoilla ikkunoiden ja ovien sijoittelu uudessa ja vanhassa rakenteessa eivät välttämättä kohtaa. Elementtijako voidaan tehdä mittaamalla nykyisten seinäelementtien koko ja aukkojen sijainti nykyisiin saumoihin nähden. Tällöin elementit voidaan mitoittaa julkisivun nykyisten elementtisaumojen moduuliverkon perusteella. Uusien puuelementtien saumajaon ei tarvitse olla sama vanhojen betonielementtien saumajaon kanssa, joten julkisivun ilmettä on mahdollista muokata arkkitehtonisessa mielessä. (Puuinfo 2010)

Runkona puuelementeissä toimii normaali tolpparunko tai kantava CLT-levyrunko. Tolppajako on järkevää suunnitella lämmöneristeen ja ulkoverhouksen mukaan. Tolpparunko voidaan tehdä kiinnittämällä tolpat ylä- ja alajuoksuihin nauloilla tai ruuveilla tai vaihtoehtoisesti NR-ristikoiden tapaan naulalevyillä. Naulalevyristikko on nopea, mittatarkka ja toimii tehokkaana jäykisteenä vinosauvojen kanssa, jos ei käytetä tuulensuojalevyä. Jos tuulensuojalevyä kuitenkin käytetään, tulee sen olla paloluokan B-s1, d0 tuulensuoja, eli esimerkiksi kipsikartonkilevy. Myös riittävän jäykkä tuulensuojalevy on tarpeen, koska asennusvaiheessa lämmöneristeen painuminen aiheuttaa painetta tuulensuojaan ja tuuletusrako saattaa tukkeutua. Rakennuslevyä on mahdollista käyttää tuulensuojana, koska se pitää elementin ristimitassaan myös asennuksessa ja kuljetuksessa. Elementti voidaan rakentaa siten, että runko on esimerkiksi 25 mm ohuempi kuin lämmöneriste, jolloin elementin asennuksessa ylimääräinen lämmöneriste painuu kasaan ja tiivistää vanhan rungon ja uuden elementin kiinnityskohdan. Elementin taakse voidaan kiinnittää myös erillinen tasausvilla, jolla saadaan aikaan tarvittava painumavara. (Puuinfo 2010)

Elementtien suojauksessa tulee olla erityisen tarkkana, jotta ne eivät kastu kuljetuksen ja asennuksen aikana. Sääsuojaus on erityisesti tärkeää, kun elementteihin on asennettu tehtaalla valmiiksi eristeet. Elementit voidaan sääsuojata pakkaamalla ne muovikalvoon tehtaalla. Suojamuovit tulee poistaa asennuksessa elementtien sisäpuolelta, jotta vanhan ja uuden rakenteen väliin ei jää muovikalvoja. Etupuolelle muovit voidaan jättää rakennusajaksi sääsuojaksi. Puiset elementit kiinnitetään vanhan betonielementin sisä- tai ulkokuoreen. Jos ulkokuori on jätetty paikalleen, tulee

sen soveltuvuus kiinnitysalustana tarkistaa lujuusteknisessä mielessä. Elementin kiinnityksen olisi hyvä olla sellainen, että elementin pystysuoruutta voidaan säätää. Kiinnitys suoritetaan elementin reunoilta ja tarvittaessa keskeltä elementtiä käyttäen normaaleja betonirakenteiden kiinnikkeitä. Kiinnikkeiden täytyy olla kuumasinkittyjä tai vastaavalla tavalla korroosiosuojattuja ja tarvittaessa ruostumattomasta teräksestä valmistettuja. Elementit voidaan suunnitella myös toisiinsa tukeutuvina. Tällöin käyttötilanteessa kiinnikkeiden tulee kestää niihin aiheutuvat vaakakuormat, esimerkiksi tuulikuormat. Palotilanteessa kiinnikkeiden pitää kuitenkin pystyä kantamaan elementin paino, jos alla oleva elementti tuhoutuu palossa. Kiinnikkeet voidaan suunnitella myös siten, että ne kantavat elementit sekä käyttötilanteessa että palotilanteessa. (Puuinfo 2010)

Myös kosteus tulee ottaa huomioon suunniteltaessa puurakenteisia julkisivuelementtejä. Kosteus aiheuttaa muodonmuutoksia rakenteissa, kuten elementtien käyristymistä ja liitosten löystymistä. Elementtien käyristyminen aiheuttaa elementtien kiinnityksiin ylimääräisiä voimia, jotka tulee huomioida kiinnityksiä mitoitettaessa. Kosteusmuodonmuutokset ovat materiaalista riippuvaisia ja niille asetetaan toleranssit, jotta muodonmuutokset eivät vahingoittaisi rakennetta. Siihen, kuinka paljon puu kutistuu ja turpoaa kosteuden vaikutuksesta, vaikuttavat merkittävästi olosuhteet, joissa puu on. (TES Energy Facade 2009)

### 3.4 CLT

CLT-levyä voidaan käyttää puisten julkisivuelementtien runkomateriaalina. CLT -sana tulee englanninkielisistä sanoista Cross Laminated Timber ja tarkoittaa ristiin liimattua puuta. CLT-levy on suhteellisen uusi rakennusmateriaali niin Suomessa kuin muuallakin maailmassa. CLT esiteltiin ensimmäisen kerran 1990-luvun alussa Itävallassa ja Saksassa ja se on siitä asti ollut mukana sekä asuinrakentamisen että muun rakentamisen sovellutuksissa Euroopassa. Muutaman viime vuoden aikana CLT-levyjen käyttö Euroopassa on lisääntynyt. CLT-levyjä käytetään myös muualla maailmassa ja niistä on tehty rakennuksia ja rakenteita esimerkiksi Yhdysvalloissa ja Kanadassa. CLT-rakentaminen on kilpailukykyistä etenkin keskikorkeassa ja korkeassa rakentamisessa. CLT-levyjä voidaan helposti hallita rakentamisen aikana niiden keveyden ja korkean esivalmistusasteen vuoksi. Elementtien keveyden vuoksi rakentamisessa voidaan käyttää kevyempiä nostureita ja perustukset voidaan tehdä kevyemmiksi. (CLT Handbook 2013) CLT-levyjä on saatavilla erilaisilla pintavaihtoehtoilla riippuen siitä, mihin käyttöön levyt tulevat. Levyjä voi pinnoittaa, mutta pinnan voi palomääräysten salliessa jättää myös näkyviin. Tällöin elementteihin on valittavana eritasoisia laatuja, joita ovat erimerkiksi Stora Enson tapauksessa: näkyvä laatu, teollinen näkyvä laatu sekä ei-näkyvä laatu. (Stora Enso, CLT -info, viitattu 22.5.2014)

CLT-levyt koostuvat useista kerroksista ristiin liimattuja lautakerroksia eli lamelleja. Tyypillisesti lautakerrokset liimataan toisiinsa nähden 90 ° kulmaan. Kerroksia voidaan kiinnittää myös esimerkiksi naulaamalla liimaamisen sijaan. (CLT-Handbook 2013) Usein lamellit kuitenkin liimataan toisiinsa formaldehydivapailiimoilla. CLT-levy koostuu vähintään kolmesta yhteen liimatusta lautakerroksesta. Kerrokset on sijoitettu aina edelliseen kerrokseen nähden kohtisuoraan. Kerroksia on tyypillisesti pariton määrä, esimerkiksi 3, 5 tai 7. Kuvassa 3.2 on havainnollistettu CLT-levyn rakennetta. Liimattaessa lautakerroksia ristiin syntyy luja ja jäykkä, hyvin paloa kestävä sekä suhteellisen kevyt puuelementti. Keski-Euroopassa ja Kanadassa CLT-levyjen käyttö on hyvin suosittua. (CLT Tekninen tiedote 2011)



**Kuva 3.2** 3- ja 5-lamellisen CLT-levyn rakenne. (Lähde: Stora Enso 2012)

CLT-levyjä on mahdollista käyttää kantavina rakenteina sekä jäykistävinä rakenteina. Elementtejä voidaan käyttää seinä- ja lattiarakenteina sekä välipohja- ja kattorakenteina. CLT-levyistä on helppo työstää erilaisia mittatarkkoja rakennuselementtejä automaattisella työstökoneella, CNC-koneella. (Puuinfo 2011) CLT-levyillä on useita eri valmistajia ja myös elementtien kutsumanimi saattaa vaihdella valmistajakohdaisesti. Valmistajia tai tuotemerkkejä ovat muun muassa CLT, KLH, X-LAM sekä Leno. Suomessa käytettävät CLT-levyt valmistetaan pääasiassa kuusesta. Muiden puulajien saatavuus on varmistettava erikseen tuotteen valmistajalta. Suomessa ei vielä valmisteta omia CLT-levyjä vaan esimerkiksi Stora Enson Suomessa käyttämät CLT-levyt tulevat Itävallasta. Stora Enso valmistaa kuitenkin Suomessa CLT-elementtejä. Pälkäneellä valmistetaan esivalmistettuja suurelementtejä ja Hartolassa sekä Pälkäneellä puurakenteisia tilaelementtejä. CLT-levyjen vakiopaksuudet vaihtelevat valmistajittain. Suomessa enimmäispaksuus on noin 400 mm ja suurin leveys elementeillä on 2,95 metriä ja pituus 16 metriä. CLT Tekninen tiedote 2011) Yhdys-

valloissa levyjen paksuudet voivat olla jopa 508 mm. Kuljetussäännökset voivat kuitenkin rajoittaa levyjen kokoa. (CLT Handbook 2013)

### 3.4.1 Lämpötekniset ominaisuudet

Rakenteen U-arvon eli lämmönläpäisykertoimen laskemiseksi muun muassa rakenteen lämmönjohtavuus  $\lambda$  täytyy tuntea. Stora Enson kuusesta valmistaman CLT-levyn lämmönjohtavuus voidaan laskea kaavalla (SP Ruotsin tekninen tutkimusinstituutti 2009)

$$\lambda = 0,000146 \cdot \rho_k + 0,035449, \quad (3.1)$$

missä  $\lambda$  on lämmönjohtavuus (W/(mK))  
 $\rho_k$  on puun irtotiheys (kg/m<sup>3</sup>).

Tällöin kuusesta tehdyn CLT-levyn lämmönjohtavuudeksi saadaan Stora Enson laskeissa käyttämällä 512 kg/m<sup>3</sup> puun irtotiheydellä (puun kosteuspitoisuus 12 %)

$$\lambda = 0,000146 \cdot 512 \frac{kg}{m^3} + 0,035449 = 0,110 \frac{W}{mK} \quad (3.2)$$

Kaava on hyväksytty CLT-levyille Ruotsin teknisessä tutkimusinstituutissa vuonna 2009 (SP Ruotsin tekninen tutkimusinstituutti 2009). Kun tunnetaan rakenteen dimensiot ja rakenteen lämmönjohtavuus, voidaan homogeenisista kerroksista koostuvan rakenteen korjaamaton U-arvo laskea seuraavalla kaavalla

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + R_1 + \dots + R_n}, \quad (3.3)$$

missä  $R_T$  on rakenteen kokonaislämmönvastus ((m<sup>2</sup>K)/W)  
 $R_{si}$  on sisäpinnan pintavastus ((m<sup>2</sup>K)/W)  
 $R_{se}$  on ulkopinnan pintavastus ((m<sup>2</sup>K)/W)  
 $R_{1...n}$  ovat rakenneosien 1...n lämmönvastukset ((m<sup>2</sup>K)/W)

Eri valmistajien CLT-levyjen lämmönjohtavuuksien arvot vaihtelevat välillä  $\lambda = 0,11 - 0,13$  W/(mK). Rakenteen lämmönläpäisykerroin voidaan laskea kaavalla 3.3. Kun valitaan ulkopinnan pintavastukseksi  $R_{se} = 0,04$  (m<sup>2</sup>K)/W ja sisäpinnan pintavastukseksi  $R_{si} = 0,13$  (m<sup>2</sup>K)/W, saadaan 100 mm paksun CLT-levyn lämmönläpäisykerroimeksi (Stora Enso 2012)

$$U = \frac{1}{0,13 \frac{m^2K}{W} + \frac{0,1m}{0,11 \frac{W}{mK}} + 0,04 \frac{m^2K}{W}} = 0,93 \frac{W}{m^2K} \quad (3.4)$$

Vastaavalla tavalla voidaan myös laskea U-arvo rakenteelle, jonka runkona on 100 mm:n CLT-levy ja eristeenä 200 mm mineraalivillaa, jonka lämmönjohtavuus on  $\lambda = 0,032 \text{ W/(mK)}$

$$U = \frac{1}{0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + \frac{0,1\text{m}}{0,11 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,2\text{m}}{0,032 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + 0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}} = 0,14 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}. \quad (3.5)$$

Tällaisella rakenteella päästään siis laskennallisesti rakentamismääräyskokoelman osassa D3 (2012) annetun seinien lämmönläpäisykertoimen, U, vertailuarvon 0,17 W/(m<sup>2</sup>K) alapuolelle. Laskennassa tulee ottaa huomioon myös puurungon ja korjauskertoimien vaikutus tarvittavilta osin.

Rakennuksen vaipan ilmatiiviys ja rakenteiden pieni lämmönläpäisykerroin ovat tärkeitä tekijöitä, sillä ne vaikuttavat rakennuksen sisäilman lämpötilaan ja kosteuteen, ääniolosuhteisiin sekä rakennuksen energiatehokkuuteen. Ilmatiiveydellä on vaikutusta myös rakenteen lämpö- ja kosteustasapainoon. CLT-levyn hyvä ilmatiiviys on merkittävä tekijä sen ominaisuuksissa. CLT-levyjen ja liitosten ilmatiiviyttä on tutkittu Holzforschungissa Itävallassa vuonna 2008. Tutkimuksissa on havaittu, että levyt ovat niin ilmatiiviitä, että ilman tilavuusvirta elementtien läpi on mittausalueen ulkopuolella. Tutkimukset on tehty standardin EN 12114:2000 mukaisesti. Vaikka elementit ovat itsessään niin tiiviitä, että erillistä ilman- ja höyrynsulkukerrosta ei välttämättä tarvita, Stora Enson mukaan elementtien saumojen ilmatiiviys tulee varmistaa asentamalla saumoihin tiivistysnauhat ulko- tai sisäpuolelle. Elementtien välisten saumojen tiiviydestä tulee huolehtia riippumatta siitä onko rakenteessa ilman- tai höyrynsulkukerrosta. CLT-levyjen mahdollisen suuren koon vuoksi elementteihin tulee luonnollisesti vain vähän saumoja, jolloin ilmatiiviin rakenteen toteuttaminen on helpompaa. Passiivitalojen ilmanvuotoluvun,  $n_{50} = 0,6 \text{ l/h}$ , saavuttaminen edellyttää saumanauhojen tai joustavien saumamassojen käyttöä elementtien saumoissa. (Stora Enso 2012)

### 3.4.2 Kosteustekniset ominaisuudet

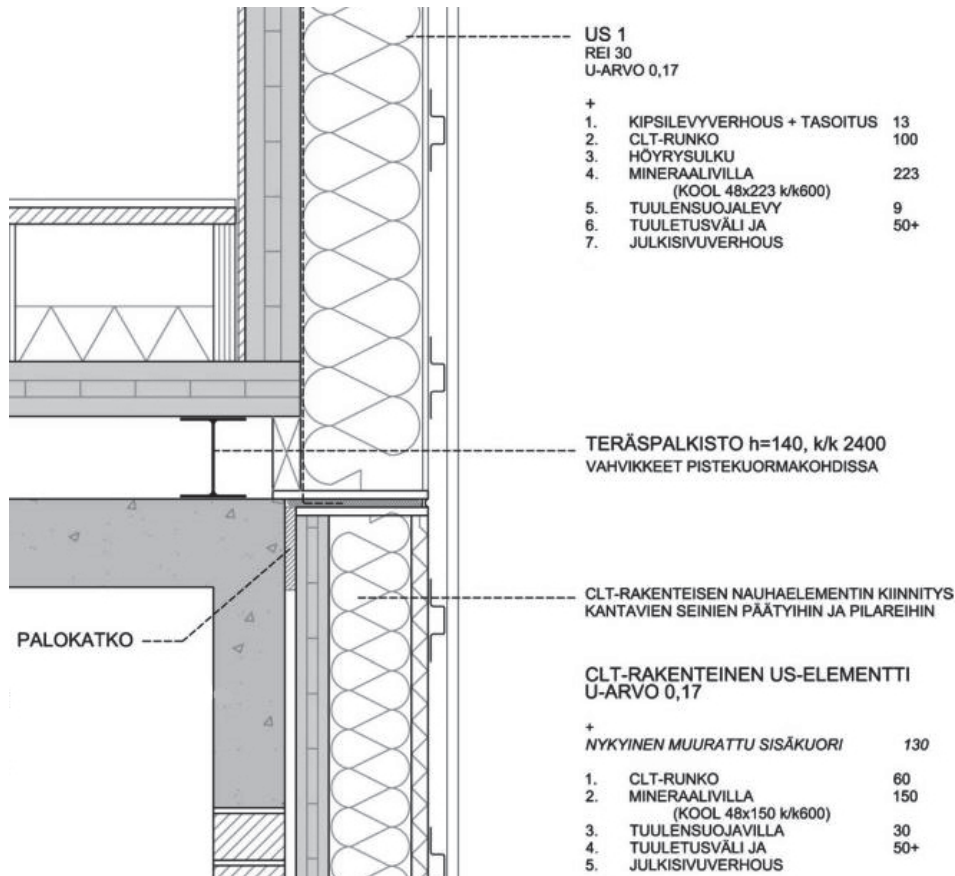
Vaikka CLT-levyt ovat käytännössä ilmatiiviitä, eivät ne silti ole vesihöyrytiiviitä. Rakenneosat ovat alttiina kosteusrasitukselle ja koska CLT-levyt ovat puuta imevät ne itseensä ilmasta kosteutta. Myös rakennuksen valmistumisen jälkeen rakenteet sisältävät yleensä kosteutta. CLT-levyissä kosteuspitoisuus on kuitenkin pieni valmistuksen jälkeen, koska levyt tehdään ja kuivatetaan sisätiloissa. Teollisesti valmistetun Stora Enson CLT-levyn kosteuspitoisuus painoprosentteina on vain  $11 \% \pm 2 \%$ . Näkyvän laadun kosteuspitoisuus on vielä matalampi.

Hygroskooppisuuden takia CLT-levyt myös tasapainottavat sisäilman suhteellista kosteutta siten, että sisäilman suhteellisen kosteuden ollessa korkeampi kuin elemen-

tin huokosilman suhteellisen kosteuden, elementti sitoo itseensä kosteutta. Kun suhteellinen kosteus ympäröivässä ilmassa on matalampi, elementti luovuttaa kosteutta. Myös CLT-levyjen vesihöyrynvastus muuttuu ulkoilman olosuhteiden mukaan. Levyt ovat vesihöyryä läpäisevämpiä kesällä, kun ilman lämpötila on korkeampi ja ilma on kosteaa. Talvella ilman ollessa kylmää ja kuivaa levyt ovat vähemmän vesihöyryä läpäiseviä. CLT-levyjen vesihöyryyn diffuusiovastuskerroin  $\mu$  on standardin SFS-EN 12524 mukaisesti 20...50. (Stora Enso 2012)

### 3.4.3 CLT-elementti

Kiinnitettäessä muita materiaaleja CLT-levyyn on otettava huomioon, että rakennekerrosten vesihöyrynvastus pienentyy rakenteessa ulospäin siirryttäessä. Toiseksi on otettava huomioon, että lämmöneristyksen kiinnittämiskäyttö on sellainen, että se ei muodosta seinärakenteeseen toista kantavaa seinärunkoa. Villa voidaan asentaa seinään joko liimaamalla, mekaanisilla kiinnikkeillä tai tekemällä seinään kevyt rankarakenne. Lämmöneristeen paikaksi suositellaan CLT-levyn ulkopuolta. Lisälämmöneristeenä CLT-levyissä tulisi käyttää vesihöyryä läpäisevää lämmöneristettä, kuten mineraalivillaa. Tiiviimmät eristeet voivat aiheuttaa kosteuden tiivistymistä CLT-levyn ja eristeen rajapintaan, mutta kondensoitumisriski on kuitenkin pieni, koska eristeen ollessa CLT-levyn ulkopuolella on CLT-levy rakenteen lämpimällä puolella. (Stora Enso 2012) Palomääräysten mukaan (RakMK E1 2011) puukuitueriste ei sovi lämmöneristeeksi lähiökerrostalojen julkisivujen korjaamiseen, koska se ei ole palo- luokkaa A2-s1, d0. Kuvassa 3.3 on esitetty CLT-julkisivuelementin esimerkkirakenneratkaisu vanhan kerrostalon sisäkuoreen kiinnitettynä.



**Kuva 3.3** Luonnos mahdollisesta ulkoseinän rakenneleikkauksesta kohteessa Joensuun Kirkkokatu 18. (Lähde: Jouni Koiso-Kanttila, KLIKK-hanke -esitys)

Kuvan 3.3 CLT-julkisivuelementin esimerkkirakenne on KLIKK-hankkeessa mukana olevasta pilottikohteesta Joensuun Kirkkokatu 18:sta, joka on suunniteltu korjattavan ja laajennettavan CLT-rakenteisilla julkisivuelementeillä ja tilaelementeillä. Seinärakenne koostuu vanhasta 130 mm paksusta muuratusta kuoresta, joka jätetään paikoilleen seinän purkamisen yhteydessä. Muuratun sisäkuoren päälle asennetaan CLT-rakenteinen nauhaelementti, joka kiinnitetään kantavien seinien päätyihin ja pilareihin. CLT-elementti koostuu 60 mm CLT-rungosta, 150 mm mineraalivillakerroksesta, jonka yhteydessä on myös 48 x 150 mm koolaus 600 mm jaolla, 30 mm tuulensuojavillasta, noin 50 mm tuuletusraosta ja arkkitehdin valitsemasta julkisivuverhouksesta. Samassa kuvassa näkyy myös rakennuksen päälle suunniteltu lisäkerros, joka on toteutettu CLT-tilaelementillä. Tilaelementti on asennettu teräspalkiston päälle, jonka tarkoituksena on jakaa kuormaa tasaisesti vanhan rungon kantaville osille. Tilaelementin seinien ja lattian rungot koostuvat 100 mm CLT-rungosta. Lattiassa CLT-rungon päälle on suunniteltu 250 mm korokepalkisto, aluslevytys sekä arkkitehdin valitsema lattiamateriaali. Seinät koostuvat CLT-rungon lisäksi rungon sisäpuolelle tulevasta kipsilevystä ja tasoituksesta sekä rungon ulkopuolelle tulevasta höyrynsulusta, 223 mm mineraalivillakerroksesta ja koolauksesta, tuulensuojalevystä, tuuletusvälistä sekä julkisivuverhouksesta. Mineraalivillan kanssa samassa yhteydessä oleva koolaus on myös 223 mm paksu.

Käytettäessä CLT-elementtejä korjaamiseen eristeet, ulkoverhoukset, ikkunat ja ovet voidaan asentaa tehtaalla valmiiksi, jolloin rakentaminen on työmaalla perinteistä rakentamista nopeampaa. Korjattaessa julkisivuja CLT-elementeillä aikaa kuluu kuitenkin enemmän elementtien mitoittamiseen ja oikeiden paikkojen mittaamiseen. Julkisivuelementtejä käytettäessä asennustarkkuuden tulee olla suuri, jotta vanhat ja uudet rakenteet saadaan kohtaamaan tarkasti. CLT-elementeissä itsessään on pieni mitavaihtelu, joten rakentaminen on mahdollista suorittaa tarkasti. (Stora Enso 2012).

### 3.4.4 CLT-elementeistä tehty tutkimus Suomessa

VTT on tehnyt vuonna 2011 tutkimuksen CLT-rakenteiden rakennusfysikaalisesta toimivuudesta. Tutkimuksessa on selvitetty laskennallisen simuloinnin avulla CLT-elementtien kosteusteknistä toimivuutta kuivien asuintilojen rakenteena Suomen ilmastossa. Rakenteita on myös verrattu tavalliseen tuuletettuun puurunkoiseen seinärakenteeseen, jossa on 225 mm lämmöneriste ja kipsilevytuulensuoja ja -sisäverhous. VTT:n tutkimuksessa CLT-elementti on toiminut ainoana seinärakenteena, eli laskelmissa ei ole otettu huomioon vanhaa sisäkuorta, kuten tässä diplomityössä tehtävissä julkisivuelementtien laskelmissa. VTT:n tekemän tutkimuksen rakenteet vastaavat siis tässä diplomityössä tutkittavien tilaelementtien rakenteita. VTT:n tekemässä tutkimuksessa on arvioitu CLT-rakenteiden kosteuden kuivumiskykyä, rakenteen kosteustasoja sekä homeen kasvun riskiä rakenteessa. Tutkittu rakenne voisi tulla seinärakenteeksi esimerkiksi kerrostaloon, jonka maksimikorkeus on noin 15 metriä. (Valtion teknillinen tutkimuskeskus 2011)

VTT:n tutkimuksessa on ollut mukana kolme erilaista rakennetta, joissa CLT-levyjen paksuudet ovat 95 mm, 145 mm ja 245 mm. Tutkimuksessa rakenteissa eristerunkona on käytetty 600 mm k-jaolla olevaa 42 mm vahvuista puurunkoa, tuulensuojalevynä on käytetty 12 mm huokoista puukuitulevyä, jonka jälkeen on 23 mm tuuletusväli ja 22 mm paksuinen puinen ulkoverhous. Eristeenä on käytetty 145 mm, 180 mm sekä 200 mm puukuitueristekerrosta siten, että ohuimman CLT-levyn kanssa on käytetty paksuinta eristekerrosta. Rakenteessa CLT-levy muodostaa höyryn- ja ilmansulun. Tehdyissä laskentatarkasteluissa CLT-levy on ajateltu yhtenäisenä männyn pintapuukerroksena eikä elementtien liimasaumojen mahdollista huonontavaa vaikutusta rakenteen tiiviyyteen ole otettu huomioon. Lämmönjohtavuutena CLT-levyillä on käytetty 0,12 W/(mK), puukuitulämmöneristeellä 0,040 W/(mK) ja tuulensuojalevyllä 0,052 W/(mK). Kaikkien testattujen rakenteiden laskennallinen U-arvo on tutkimuksissa ollut 0,17 W/(m<sup>2</sup>K). Ulkoilmastona tarkasteluissa on käytetty Jyväskylän vuoden 1979 mitoitusäättä, joka edustaa poikkeuksellisen kylmää vuotta. Viistosateen vaikutus on otettu huomioon laskennassa. Tarkasteluissa tuuletusraon ilmanvaihtuvuudeksi on valittu 40 l/h ja koko rakenteen alkukosteudeksi on valittu 76 % RH suhteellinen kosteus, joka vastaa CLT-levyille ilmoitettua suurinta kosteuspitoisuutta 14 paino- %. Tuuletusraon ilmanvaihtuvuutena on kokeiltu tutkimuksessa myös muita arvoja kuin 40 l/h. Tutkimuksen tuloksissa kuitenkin todetaan, että



sillä ei ollut merkittävää vaikutusta CLT-elementin kosteuteen, oliko tuuletusraon ilmanvaihtuvuus 40 l/h vai hyvin suuri. 40 l/h ilmanvaihtuvuus vastaa 23 mm tuuletusvälillä ja 15 m seinäkorkeudella noin 0,17 m/s ilman virtausnopeutta tuuletusväli- lissä. Tällainen oletettu tuuletus on mahdollinen kuvatulla rakenteella, jonka ala- ja yläosat ovat avoinna ulkoilmaan. VTT:n tutkimuksessa homeen kasvua on kuvattu homeindeksillä samoin kuin tässä diplomityössä. Tutkimuksessa on oletettu, että tuu- letusrako pysyy koko ajan puhtaana ja ilmanvaihtuvuus pysyy samana. Myös kosteu- den kulkeutuminen rakenteeseen ilmavuotojen vaikutuksesta on estetty. (Valtion tek- nillinen tutkimuskeskus 2011)

Tarkasteluissa seinäelementtien lämmönläpäisykertoimeksi on valittu kaikissa raken- teissa  $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Eristyksenä on käytetty puukuitueristettä, jonka lämmön- johtavuus on  $0,040 \text{ W}/(\text{mK})$ . Laskenta-aika on tutkimuksessa ollut neljä vuotta ja vuodet ovat laskennassa olleet keskenään samanlaisia. Tutkimuksessa on saatu lop- putulokseksi, että CLT-rakenteet kuivuvat alkukosteudestaan nopeasti jo laskennan alkuvaiheessa ja neljän vuoden jälkeen saavuttavat turvallisen 47 - 51 % RH suhteel- lisen kosteuden tason. Tutkimuksessa tarkastelluissa CLT-elementeissä ei ollut ha- vaittu rakenteen kriittisimmässä kohdassa, eristeen ja tuulensuojalevyn rajapinnassa, homeen kasvun mahdollistavia olosuhteita. Tutkimuksen yhteenvedossa todetaan, että tarkasteltujen tuuletettujen CLT-elementtien kosteustekninen toimintavarmuus Suomen ilmastossa, normaalissa asuinkäytössä, kuivien sisätilojen kosteuskuormi- tuksella on vähintään yhtä hyvä tai osittain jopa parempi kuin tavallisilla puuraken- teilla. (Valtion teknillinen tutkimuskeskus 2011)

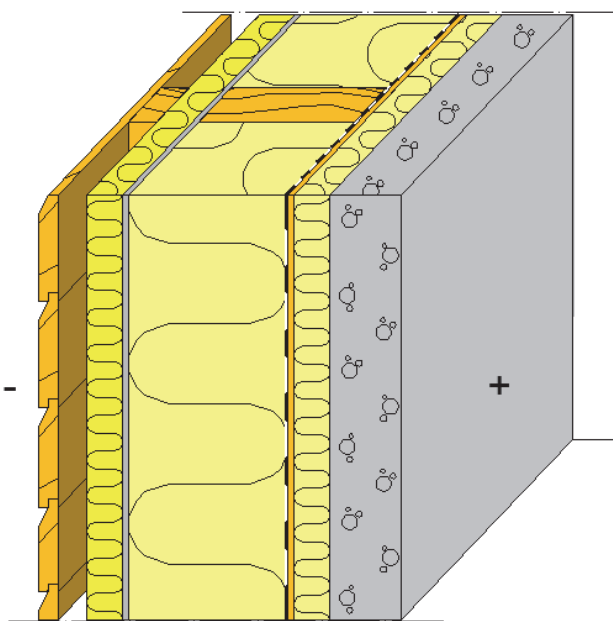
### 3.5 TES

TES-elementti on kehitetty vuosina 2008–2009 toteutetussa tutkimushankkeessa nimeltään Timber-based element systems for improving the energy efficiency of the building envelope (TES Energy Façade). Tutkimushankkeessa olivat mukana Suo- mesta Aalto- yliopisto, Saksasta Technische Universität München (TUM) sekä Nor- jasta Norwegian University of Science and Technology (NTNU). TES-elementit ovat itsekantavia, puurunkoisia rakennuselementtejä, jotka on suunniteltu kerrostalojen korjausrakentamista varten. Samoin kuin CLT-elementtejä käytettäessä, TES- menetelmässä on ideana elementtien korkea esivalmistusaste ja rakentamisessa tavoit- tellaan telineetöntä asentamista. Koska elementit tehdään pitkälti valmiiksi jo tehtaal- la, työmaa-ajat lyhenevät huomattavasti. Tämä saa aikaan sen, että rakennuksen käy- tölle aiheutuu vähemmän haittaa, kustannukset ovat helpommin laskettavissa ja kos- teudenhallinta on huomattavasti helpommin toteutettavissa koko rakennusprojektin aikana.

TES-elementtien itsekantava puurunko mahdollistaa sen, että elementteihin voidaan asentaa tarkoituksenmukainen määrä lämmöneristettä, kohteesta riippuen, aina 300 -

400 mm asti. Talotekniikka-asennukset voidaan tehdä julkisivuelementteihin, jolloin kerrostalon korjauksen yhteydessä voidaan helposti uusia esimerkiksi vanhoja viemäriputkistoja ja rakennuksen ilmanvaihtoa voidaan parantaa. Myös parvekkeiden asennus ja lisärakentaminen onnistuvat TES-elementeillä rakennettaessa. TES-elementit valmistetaan kohteen mukaisesti tehtaalla ja elementteihin voidaan asentaa valmiiksi jo ulkoverhous ja mahdollinen sisäverhous. Elementit rakennetaan työmaalta saatujen mittojen mukaisesti, jotka voidaan mitata laserkeilauksen avulla. TES-elementit voidaan asentaa vanhaan kerrostaloon siten, että vanhoista betonielementeistä poistetaan vain ulkokuori ja lämmöneristys, joiden tilalle elementti asennetaan. Vaihtoehtona on myös, että TES-elementti korvaa esimerkiksi kirjahyllyrunkoissa lähiökerrostalossa kokonaan vanhan ei-kantavan julkisivuelementin, jolloin TES-elementteihin voidaan asentaa jo tehtaalla sopiva sisäverhous. (TES Energy Facade 2009)

TES-elementit voivat olla rungoltaan monikerroksisia ristiin koolattuja tai yksikerroksisia. Runko on tehty sahatavaraista tai runkona voi olla vaihtoehtoisesti I-profiiliranka. Koolauksena rungossa voidaan käyttää myös sahatavaraa ja tuuletusväliä tulee olla palon leviämistä estävä palokatko. Elementin rakennetyyppeihin vaikuttavat elementin suunta ja koko. Jos elementit ovat pitkiä ja kapeita, kuormat siirtyvät pääasiassa elementin reunarankojen kautta. Tällöin riittää, että elementin runko on kevytrakenteisempi, esimerkiksi ristiin koolattu. Jos taas elementti on vaakasuuntainen ja leveä, vaikuttaa runko enemmän elementin kantavuuteen ja rakenteiden runkotolppien tulee olla tukevammat. Elementtien jäykistys voidaan hoitaa sisä- ja ulkopuolisilla rakennuslevyillä. Peruselementti koostuu aina tietyistä rakennekerroksesta, joita voidaan muokata tarpeen mukaan. Kuvassa 3.4 on esitettyä rakennekerrokset, joita on mahdollista käyttää TES-elementissä.



**Kuva 3.4** TES-elementin poikkileikkaus yhdessä vanhan betonikuoren kanssa.

Elementin rakennekerrokset voivat olla sisältä ulospäin lueteltuna esimerkiksi seuraavanlaiset:

- Kokoonpuristuva tasausvilla
- Jäykistävä rakennuslevy
- Ilmansulku
- Lämmöneriste ja ranka
- Tuulensuojalevy
- Lisälämmöneriste
- Tuuletusrako ja koolaus
- Ulkoverhous

Tasausvilla on kokoonpuristuvaa ja se toimii joustokerroksena elementtien asennusvaiheessa. Joustokerros tarvitaan, koska vanha rakenne on todennäköisesti purkamisen jälkeen liian epätasainen elementin tiivistä asennusta varten. Tasausvillan tarvittava määrä määritetään kuntotutkimuksien yhteydessä. Tasausvillaa paksuus voi olla vanhan rakenteen epätasaisuudesta riippuen esimerkiksi 50–100 mm:ä. Tasausvillalla ei ole kokoonpuristumisensa vuoksi samanlaisia lämpöteknisiä ominaisuuksia kuin vastaavalla määrällä kokoonpuristumatonta villaa. Kun käytetään suuria TES-elementtejä, voi elementtien asennus vaikeutua kohtuuttomasti tasausvillan vuoksi. Tällöin elementin ja vanhan rakenteen väliin voidaan jättää rako ja täyttää se märkäpuhallettavalla eristeellä. (TES Energy Facade 2009)

Rakennuslevynä TES-elementtien sisäpuolella voidaan käyttää esimerkiksi kipsilevyä, vaneria, OSB-levyä tai kovaa puukuitulevyä. Rakennuslevy toimii elementeissä jäykistävänä rakenteena sekä myös tarvittaessa ilman- tai höyrynsulkua suojaavana kerroksena. Höyrynsulun vesihöyrynläpäisevyys tulee suunnitella vanhasta rakenteesta riippuen. Vanhan rakenteen ollessa lähes diffuusiotiivis, kuten esimerkiksi betonikuori, riittää rakenteeseen pelkkä ilmansulku. Jos vanha rakenne ei ole diffuusiotiivis, asennetaan rakenteeseen höyrynsulku, jonka tarpeellisuus ja diffuusiovastus pitää tarkistaa tapauskohtaisesti. Rakenteen ilmatiiviydessä ja diffuusiotiiviydessä tulee ottaa huomioon mahdolliset betonielementtien halkeamat, elementtien saumat, ikkunoiden ja ovien liitokset ja ilmanvaihdon läpivientien aukot tiivistä heikentävänä tekijänä ja nämä kohdat tulee tiivistää tarkasti esimerkiksi joustavalla tiivistysmassalla tai -vaahdolla. Ilmansulun jatkokset julkisivuelementtien välillä tulee tehdä myös ilmatiiviiksi ja limityksistä tulee huolehtia. Ilmansulkukerros voidaan asentaa vanhan sisäkuoren päälle ennen uusien julkisivuelementtien asentamista, jolloin asennustyö ja saumojen tiivistämien onnistuu helpommin. Jos ilmansulku asennetaan vanhan epätasaisen ja karhean betonisisäkuoren päälle, tulee olla tarkkana, että ilmansulku ei pääse rikkoutumaan. Ilmansulkukerrokseksi sopii vesihöyryä läpäisevä ilmansulkukangas, joka asennetaan kauttaaltaan rakennuksen koko ulkovaipan päälle. Ilmansulkukankaan saumat teipataan ilmatiiviiksi. Ikkunat jäävät tässä tapauksessa elementtien asennuksen ajaksi peittoon, mutta tuulensuojakangas

voi olla läpikuultavaa, jolloin huoneistot saavat jonkin verran valoa. Ikkuna-asennuksen yhteydessä tuulensuojakankaaseen tehdään ikkuna-aukot. (TES Energy Facade 2009)

Tuulensuojalevyiksi elementteihin käy esimerkiksi huokoinen puukuitulevy tai kipsilevy lisäeristeellä tai tuulensuojavilla. Palomääräysten mukaisesti korkeisiin rakennuksiin tulee asentaa palamaton tuulensuojalevy. Ulkoverhousmateriaalin valintaan vaikuttavat myös palomääräykset. TES-elementit täyttävät suoraan rakentamismääräyskokoelman osan E1 (2001) vaatimukset, jos elementissä käytettävät eristeet ovat paloluokkaa A2-s1, d0. Tätä alemmaa luokkaa olevien lämmöneristeiden kanssa palon leviäminen tulee estää eristykseen, ulkoseinärakenteen sisällä sekä ulkoseinän ja osastoivan rakennusosan liitoksen kautta. Julkisivuelementtien tuuletusrakoihin tulee asentaa myös palokatkot, jotka estävät palon leviämisen tuuletusraossa. (TES Energy Facade 2009)

### 3.5.1 Lämpötekniset ominaisuudet

TES-menetelmällä pyritään pääasiallisesti parantamaan vanhan seinärakenteen lämmönvastusta. Jotta vanhassa rakennuksessa voitaisiin saavuttaa passiivitalon kriteerit seinien U-arvoissa (n. 0,08–0,15 W/(m<sup>2</sup>K)), tulee alkuperäisen rakenteen päälle lisättävän lämmöneristekerroksen paksuuden olla noin 200–400 mm:ä. TES-elementin lämmönvastuksen lisäys on esimerkiksi 250 mm eristepaksuudella noin 5,423 (m<sup>2</sup>K)/W ja vastaavasti 400 mm eristepaksuudella 8,621 (m<sup>2</sup>K)/W. Näissä TES Energy Façade -hankkeessa tehdyissä laskuissa on oletettu lämmöneristeen lämmönjohtavuudeksi 0,037 W/(mK) ja sisäisen konvektion on oletettu huonontavan eristeen lämmönjohtavuutta 10 %:lla. Paksuilla lämmöneristekerroksilla sisäisellä konvektiolla on merkittävä vaikutus lämmöneristeen eristävyYTEEN ja myös kosteuden kuljettamiseen eristeen sisällä. (TES Energy Facade 2009)

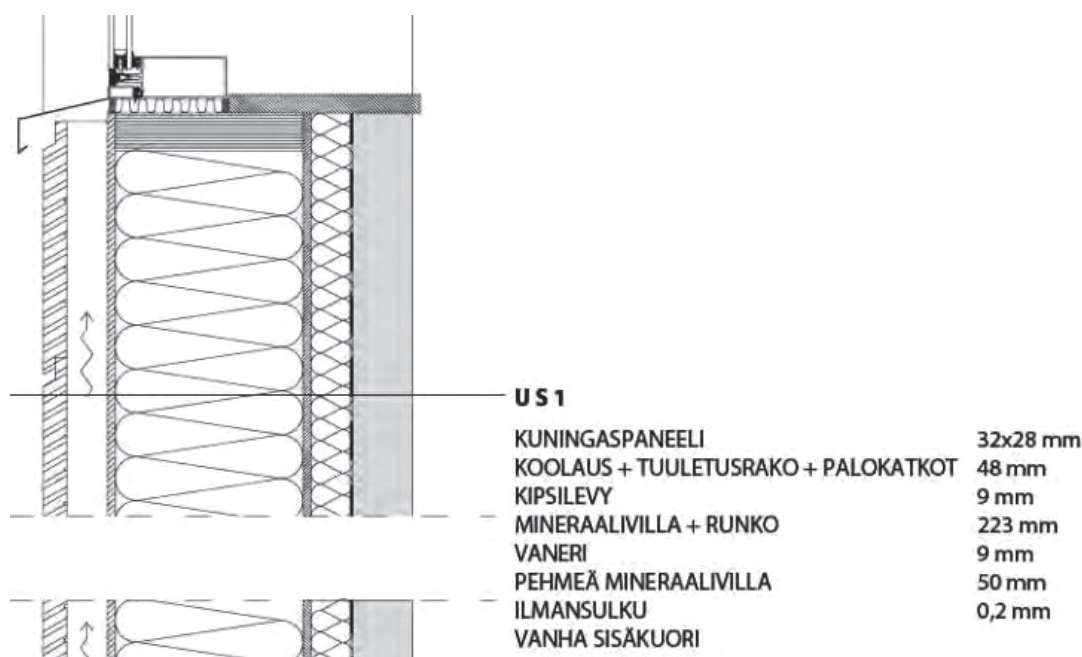
Rungon vaikutus U-arvoon tulee ottaa huomioon huonontavana tekijänä. Runkotolppa aiheuttaa rakenteeseen kylmäsillan, joka huonontaa U-arvoa. Kylmäsiltavaikutus riippuu paljolti runkotolpasta ja esimerkiksi I-profiilisilla runkotolpilla sekä lämpökatkotolpilla kylmäsiltavaikutus on huomattavasti pienempi kuin sahatavaratolpilla. Kylmäsiltavaikutuksen vähentämiseksi elementtien runkotolpat kannattaisikin siis tehdä lämpökatko- tai I-profiilirakenteisina. Myös liitosten kylmäsiltavaikutus tulee ottaa huomioon rakenteita suunniteltaessa ja rakentaessa. Kaikki elementtien liitokset on tehtävä työmaalla ilmatiiviiksi huolehtimalla siitä, että ilmansulkukerrokset jatkuvat elementtien välillä. Jatkuvuus tulee varmistaa jatkosten päälle asennettavilla ja liitospintaa puristavilla kerroksilla tai teippaamalla. (TES Energy Facade 2009)

### 3.5.2 Kosteustekniset ominaisuudet

TES-elementin asentaminen vanhan betonisandwich-ulkoseinän sisäkuoren päälle nostaa alkuperäisen seinärakenteen lämpötilaa, jolloin kosteustekninen toiminta paranee. Rakenteen lämmönvastus lisääntyy alkuperäiseen nähden ja myös rakenteen tiiviys paranee. Tämä nostaa vanhan rakenteen lämpötilan lähelle sisälämpötilaa ja samalla nostaa rakenteen sisällä olevaa kriittisen vesihöyrypitoisuuden rajaa. Tällöin rakenne kuivuu paremmin ja mahdollisuus kosteuden tiivistymiseen rakennuksen nurkissa ja kylmäsiltojen kohdilla pienenee. Suunniteltaessa ja asennettaessa TES-elementtejä vanhan rakenteen päälle vanhassa rakenteessa olevan kosteuden pois pääsy tulee huomioida. Vanhassa rakenteessa olevan kosteuden tulee päästä vähitellen kuivumaan rakenteesta pois. (TES Energy Facade 2009)

### 3.5.3 TES-elementti

KLIKK-hankkeeseen liittyen on Oulun yliopiston arkkitehtuurin osastolla tehty harjoitustöitä lähiökerrostalojen korjaamisesta. Harjoitustöissä on esitelty mahdollisten pilottikohteiden rakennevaihtoehtoja sellaisissa tilanteissa, että kyseisiä kohteita lisälämmöneristetään ja laajennetaan rakentamalla lisäkerroksia. Esimerkkirakennat-  
kaisuna tässä on Matti Rajamaan ja Juho Lonkilan ehdotus lähiökerrostalon korjaamiseksi. Kuvassa 3.5 on poikkileikkaus Oulun Kaukovainion asuinalueella sijaitsevan Asunto Oy Mustikkakankaan suunnitellusta ulkoseinärakenteesta. Ulkoseinää on ehdotettu korjattavaksi ja lisäeristettäväksi kuvan mukaisesti TES-elementeillä. TES-elementin osuus poikkileikkauksesta on kaikki muu paitsi vanha betoninen sisäkuori ja mahdollisesti sisäkuoreen työmaalla kiinnitetty ilmansulku. Korjauksen yhteydessä vanha seinärakenne on suunniteltu poistettavaksi sisäkuoreen asti ja kantavan sisäkuoren päälle on suunniteltu TES-elementit, joihin ikkunat ja ovet on asennettu valmiiksi tehtaalla. TES-elementtien pintaverhoilu on suunniteltu toteutettavaksi työmaalla.



**Kuva 3.5** Luonnos mahdollisesta ulkoseinän rakenneleikkauksesta kohteessa Asunto Oy Mustikkakangas. (Lähde: Juho Lonkilan ja Matti Rajamaan harjoitustyö kerrostalon korjauskurssilla, Oulun yliopisto, Arkkitehtuurin osasto)

Vanhan betonisen sisäkuoren päälle on asennettu 0,2 mm ilmansulkukerros, jonka päälle asennetaan TES-elementti. Elementti koostuu pehmeästä 50 mm tasausmineraalivillasta, elementtiä jäykistävästä 9 mm vanerista, 223 mm puurungosta ja lämmöneristeestä, 9 mm kipsilevystä, 48 mm koolauksesta ja tuuletusraosta sekä pinta-verhouksena käytetystä 28 mm paksusta kuningaspaneelistä. Tuuletusraossa on myös palokatkot palon etenemisen estämiseksi tuuletusraossa.

CLT- ja TES-elementit ovat siis kustannus- ja energiatehokkaita sekä ekologisia puuelementtejä ja niillä voidaan saada uutta ilmettä Suomen lähiöihin. Puupohjaisten rakennusmateriaalien käyttö, uusien mittausmenetelmien hyödyntäminen sekä tietomallien käyttö korjauksen suunnittelussa ovat myös uusien julkisivuelementtien keskeisiä edistysaskeleita. Lisäksi etuna on se, että elementtien sisään voidaan asentaa tarvittaessa uusia talotekniikkajärjestelmiä. Jotta kuitenkin voidaan varmistua CLT- ja TES-elementtien lämpö- ja kosteusteknisestä toimivuudesta lähiökerrostalojen julkisivuelementteinä, tulee niiden rakennusfysikaalista toimintaa tutkia lisää. Tässä työssä elementtien toimintaa tarkastellaan laskennallisesti ja sen vuoksi seuraavassa kappaleessa on esitetty lämmön- ja kosteudensiirron teoriaa, joka tulee hallita, jotta laskentatarkasteluja voidaan tehdä riittävällä tarkkuudella.

## 4 LÄMMÖN JA KOSTEUDEN SIIRTYMISEN TEORIAA

Tässä kappaleessa kerrotaan lämmön ja kosteuden siirtymismuodoista ja kosteuslähteistä, jotka vaikuttavat seinärakenteiden toimintaan. Tämän kappaleen kaavat ja teoria toimivat runkona työssä tehtäville laskentatarkasteluille.

### 4.1 Lämmön siirtymismuodot

Kaasuissa molekyylit liikkuvat ja törmäävät toisiin molekyyleihin. Lämmöllä tarkoitetaan aineessa olevien molekyyliden liike-energiaa, joka kasvaa lämpötilan noustessa. Lämpöopin sääntöjen mukaisesti lämpö siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan ja siirtymistapoja on kolme erilaista. Nämä ovat johtuminen aineessa, säteily kahden pinnan välillä sekä konvektio. Lämmön siirtyminen on lämpöenergian välittymistä, joka johtuu lämpötilaeroista. Rakennuksiin vaikuttavat kaikki kolme lämmön siirtymismuotoa, mutta seinärakenteissa merkittävin lämmön siirtymismuoto on johtuminen.

#### 4.1.1 Johtuminen

Johtumisessa ainetta ei siirry vaan lämpö siirtyy systeemin sisällä molekyyliden liikeenergian siirtyessä molekyylistä toiseen. Lämpöenergia siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan. (Siikanen 1996) Johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheys,  $q$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), homogeenisessa ja isotrooppisessa materiaalissa saadaan laskettua Fourierin lain avulla kaavalla (Hagentoft 2001)

$$q = -\lambda \nabla T = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (4.1)$$

|       |           |    |  |
|-------|-----------|----|--|
| missä | $q$       | on | lämpövirran tiheys ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) |
|       | $\lambda$ | on | lämmönjohtavuus ( $\text{W}/(\text{mK})$ )   |
|       | $T$       | on | lämpötila (K)                                |

Jatkuvuustilassa lämpötilajakauman ollessa lineaarinen materiaalikerroksen läpi siirtyvä lämpövirran tiheys saadaan kaavalla

$$q = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{a} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{a}, \quad (4.2)$$

missä  $d$  on materiaalikerroksen paksuus (m)  
 $T_{1,2}$  on lämpötila materiaalikerroksen eri puolilla ( $^{\circ}\text{C}$ , K)

Tällöin lämpövirta,  $\Phi$  (W), materiaalin läpi saadaan kaavalla

$$\Phi = qA = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (4.3)$$

Yhtälöstä 4.1 voidaan havaita, että lämpövirran tiheys  $q$  on positiivinen liikuttaessa lämpötilagradienttia vastaan, eli lämpö tasaantuu siirtymällä lämpimästä tilasta kylmempään. Yhtälössä 4.1 esiintyvä materiaaliominaisuus, lämmönjohtavuus ( $\lambda$ ), riippuu sekä lämpötila- että kosteusolosuhteista ja se voidaan määritellä kokeellisesti eri materiaaleille. Lämmönjohtavuudella ilmoitetaan lämpövirran tiheys jatkuvuustilassa pituusyksikön paksuisen, tasa-aineisen ainekerroksen läpi, kun lämpötilaero ainekerroksen pintojen välillä on yksikön suuruinen (Siikanen 2014). Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo  $\lambda$  voidaan laskea standardin SFS-EN ISO 10456 mukaisesti tai voidaan vaihtoehtoisesti käyttää lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoja sisältäviä taulukoita. (SFS-EN ISO 6946 2008)

Epästationäärisessä tilanteessa rakenteessa vallitsevien lämpötilojen ja lämpövirran tiheyden määrittämiseen eri ajanhetkillä tarvitaan energiataseyhtälö. Ottamalla huomioon termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukainen energian säilymlaki saadaan johtumisen energiataseyhtälö, joka on muotoa (Vinha 2011)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q' = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (4.4)$$

missä  $\rho$  on materiaalin tiheys ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $c$  on materiaalin ominaislämpökapasiteetti ( $\text{J}/(\text{kgK})$ )  
 $t$  on aika (s)  
 $q'$  on lämmönkehitys/lämpöhäviö ( $\text{W/m}^3$ )

Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan systeemiin tuodun ja siinä kehittyneen energian summa on yhtä suuri kuin siitä otetun ja siihen varastoituneen energian summa. Yllä olevassa yhtälössä vasemmanpuoleisilla termeillä kuvataan lämmön johtumista tilavuusosan läpi x-, y- ja z-suunnassa. Termi  $q'$  kuvaa lämmön sitoutumista tai kehittymistä tilavuusalkiossa jonkin ulkoisen reaktion tai materiaalis- sa tapahtuvan kemiallisen reaktion seurauksena. Kaavan oikeanpuoleinen termi taas kuvaa tilavuusalkioon sitoutuvaa lämpöenergiaa. (Hagentoft 2001) Yhtälössä olevaa termiä  $\rho c$  kutsutaan tilavuuslämpökapasiteetiksi. Kaava 4.4 tarkoittaa siis sitä, että tarkasteltavaan pisteeseen tulevan ja siitä lähtevän lämpövirran erotus + lämmönkehitys / lämpöhäviö tarkasteltavassa pisteessä on tilavuusalkioon varastoitu energia. (Vinha 2011)



Terminen diffusiviteetti  $a$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) kuvastaa, kuinka nopeasti lämpötilamuutokset etenevät materiaalissa. Termiäinen diffusiviteetti saadaan jakamalla materiaalin lämmönjohtavuus tilavuuslämpökapasiteetilla

$$a = \frac{\lambda}{\rho_0 c}, \quad (4.5)$$

missä  $\rho_0$  on materiaalin kuivatiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Mitä suurempi materiaalin termiäinen diffusiviteetti on, sitä nopeammin materiaali saavuttaa muutoksen jälkeisen tasapainotilan. (Vinha 2007) Kaavasta 4.5 voidaan havaita, että lämmönjohtavuus vaikuttaa suoraan siirtyvän lämpöenergian määrään. Lämmönjohtavuuden kaksinkertaistuessa myös siirtyvän lämpöenergian määrä kaksinkertaistuu, jos reunaehdot pysyvät samoina.

Rakennusfysikaalisissa laskelmissa ja rakennusten lämmöneristysten suunnittelussa käytetään lämmönjohtavuuden ohella myös lämmönvastusta. Lämmönvastus siis ilmaisee tietyn rakennekerroksen tai -osan lämmönsiirtymisvastuksen. (Vinha 2007) Stationääritilanteessa rakenteen eri kerroksissa lämpötila muuttuu lämmönvastuksien suhteissa. Jos lämpöteknisenä suunnitteluarvona käytetään lämmönjohtavuutta, saadaan rakennekerroksen lämmönvastus  $R$  ( $(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$ ) homogeenisen materiaalikerroksen paksuuden  $d$  ( $\text{m}$ ) ja lämmönjohtavuuden  $\lambda$  suhteena (SFS-EN ISO 6946 2008).

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (4.6)$$

Koko rakenteen lämmönvastusta kuvataan lämmönläpäisykerroinella  $U$ .  $U$ -arvo ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) ilmoittaa lämpövirran tiheyden, joka jatkuvuustilassa siirtyy seinän läpi, kun lämpötilaero on yksikön suuruinen.  $U$ -arvo on rakenteen kokonaislämmönvastuksen käänteisarvo. Lämmön siirtyessä rakennekerroksen läpi kohtisuoraan saadaan homogeenisista kerroksista koostuvan rakenteen lämmönläpäisykerroin kaavasta (SFS-EN ISO 6946 2008)

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + R_1 + \dots + R_n}, \quad (4.7)$$

missä  $R_T$  on rakenteen kokonaislämmönvastus ( $(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$ )  
 $R_{si}$  on sisäpinnan pintavastus ( $(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$ )  
 $R_{se}$  on ulkopinnan pintavastus ( $(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$ )  
 $R_{1\dots n}$  ovat rakennekerrosten 1...n lämmönvastukset ( $(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$ )

Rakenteen kokonaislämmönvastus  $R_T$  voidaan laskea summaamalla eri rakenneosien lämmönvastukset silloin, kun rakennusosan ainekerrokset ovat tasapaksuja ja tasa-

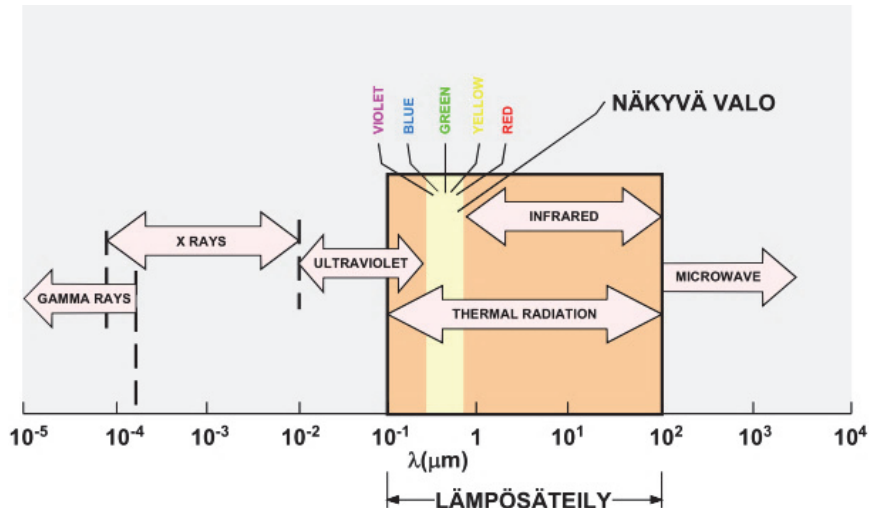
aineisia ja lämpö siirtyy rakennetta vastaan kohtisuoraan (RakMK C4 2003). Kylmäsiltojen vaikutus rakenteessa voidaan ottaa huomioon laskemalla lämmönvastus yläraja - alaraja menetelmällä Standardin SFS-EN ISO 6946 mukaisesti. Tällä menetelmällä rakenteen kokonaislämmönvastus saadaan näiden arvojen keskiarvona. Menetelmää ei voida käyttää, jos epätasa-aineiselle rakenneosalle määritettyjen lämmönvastusten ylä- ja alalikiarvon suhde on yli 1,5 tai, jos rakenteessa on metallirakenteiden muodostamia kylmäsiltoja. (SFS-EN ISO 6946 2008)

Pintavastusten arvoina voidaan käyttää laskennallisia arvoja. Pintavastusten arvoina käytetään ulkoseinien sisäpinnassa arvoa  $0,13 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  ja ulkopinnassa  $0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  standardin SFS-EN ISO 6946 (2008) mukaisesti. Jos lämpövirran suunta poikkeaa vaakatasosta enintään  $\pm 30^\circ$ , käytetään yllä mainittuja arvoja. Yllä mainitut pintavastukset ovat voimassa vain pinnoille, jotka ovat kosketuksissa ilman kanssa. (SFS-EN ISO 6946 2008) Jos rakenteen ulkopinta rajoittuu tuuletustilaan tai hyvin tuulettuvaan ilmväliin, voidaan ulkopinnan pintavastuksena käyttää sisäpinnan arvoa (RakMK C4 2003)

#### 4.1.2 Säteily

Energian siirtymistä sähkömagneettisena aaltoliikkeenä kutsutaan säteilyksi. Säteilyä muodostuu aineen atomien ja molekyyliissä olevien elektronien paikkojen muuttuessa. Säteilyssä lämpöenergia siirtyy sähkömagneettisina aaltoina kahden eri lämpötilassa olevan pinnan välillä eikä säteily tarvitse väliainetta edetäkseen. Väliaine saat-  
taa jopa hidastaa säteilyn etenemistä pintojen välillä. Säteilyä tapahtuu toisaalta pintojen välillä vaikka pintojen lämpötilat olisivat samatkin, mutta tällöin energiaa ei siirry nettomääräisesti ollenkaan. (Vinha 2011) Kaikki kappaleet, jotka ovat lämpötilaltaan absoluuttisen nollapisteen yläpuolella, lähettävät eli emittoivat säteilyä ja eniten lämpösäteilyä emittoi musta kappale. Pintamateriaalin laatu vaikuttaa siihen, kuinka paljon kappale emittoi säteilyä. (Siikanen 1996)

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa säteily jaetaan lyhyt- ja pitkäaaltoiseen lämpösäteilyyn. Lyhytaaltoista lämpösäteilyä on tyypillisesti auringosta lähtevä säteily ja pitkäaaltoista säteilyä kappaleiden pinnoista lähtevä lämpösäteily. Lyhytaaltoista säteilyä on myös ilmakehästä ja pilvistä heijastunut diffuusi säteily. Diffuusiasäteilyä syntyy auringonsäteilyn heijastuessa ilmakehässä olevista hiukkasista ja molekyy-leistä tasaisesti eri suuntiin. Myös maan pinnalta ja rakennuksista auringonsäteily heijastuu diffuusina lyhytaaltoisena säteilyinä. Osa lyhytaaltoisesta säteilystä voi absorboitua pintaan, joka taas emittoituu takaisin pinnasta pitkäaaltoisena säteilyinä. Lämpösäteily käsittää aallonpituusalueen  $10^{-1}$ - $10^2 \text{ }\mu\text{m}$ . Kappaleen lämpötilan noustessa säteilyn intensiteetti kasvaa ja suurempi osa lähtevästä säteilystä on lyhytaaltoista säteilyä. Kuvassa 4.1 on esitetty sähkömagneettisen säteilyn spektri, josta nähdään, että näkyvän valon osuus osuu lyhytaaltoisen lämpösäteilyn alueelle. (Vinha 2011)



**Kuva 4.1** Sähkömagneettisen säteilyn spektri. (Lähde: Vinha 2011)

Stefan-Boltzmannin lain mukaan on olemassa korkein arvo pinnasta lähtevälle säteilyteholle. Tätä kutsutaan ideaalisen mustan kappaleen säteilemäksi tehoksi  $E_b$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) ja se on suoraan verrannollinen lämpötilan neljänteen potenssiin. (Hagentoft 2001)

$$E_b = \sigma T_s^4, \quad (4.8)$$

missä  $\sigma$  on Stefan-Boltzmannin vakio,  $5,67 \times 10^{-8} \text{ (W}/(\text{m}^2\text{K}^4))$   
 $T_s$  on pinnan lämpötila (K).

Mustan kappaleen ja todellisen kappaleen ominaisuudet ovat erilaisia. Tavallisten kappaleiden pinnat eivät pysty emittoimaan samaa määrää energiaa kuin mustan kappaleen pinta. Suhdetta tavallisen kappaleen säteilytehon  $E$  ja ideaalisen mustan kappaleen säteilytehon  $E_b$  välillä kutsutaan emissiviteetiksi  $\varepsilon$  eli (Hagentoft 2001)

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b}. \quad (4.9)$$

Pinnan emissiviteetti vaihtelee välillä 1-0 ja se on riippuvainen kappaleen pinnan laadusta. Yleensä rakennusmateriaaleilla emissiviteetit ovat melko suuria, huonelämpötila-alueella 0,8 - 0,95. Poikkeuksena tästä ovat lähinnä kiiltävät metallipinnat. (Björkholtz 1997) Todellisen pinnan lähettämän kokonaisenergian suuruus  $E$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) saadaan kaavasta (Vinha 2011)

$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon \sigma T_s^4. \quad (4.10)$$

Säteilyenergian kohdatessa materiaalin pinnan se osittain heijastuu, osittain absorboituu ja osittain läpäisee kappaleen. Eri säteilykomponenttien osuutta kokonaissäteily-

tä kuvataan erilaisilla kertoimilla:  $\rho$  = heijastuskerroin (-),  $\alpha$  = absorptiokerroin (-) ja  $\tau$  = läpäisykerroin (-). Näillä kertoimilla on voimassa yhtälö

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (4.11)$$

Rakennusfysiikan tarkasteluissa kiinteän kappaleen ei oleteta läpäisevän säteilyä, jolloin  $\tau = 0$ . Tärkeänä poikkeuksena on kuitenkin lasi ja jotkut muut läpinäkyvät materiaalit, jotka läpäisevät lyhytaaltoista säteilyä. Kun läpäisy merkitään nolllaksi, voidaan yhtälöllä laskea pinnan heijastuskerroin. Tällöin yllä mainittu yhtälö voidaan kirjoittaa muodossa (Hagentoft 2001)

$$\rho = 1 - \alpha. \quad (4.12)$$

Rakennusfysiikan tarkasteluissa pinnat voidaan ajatella harmaiksi pinnoiksi. Harmaista pinnoista säteilyn ajatellaan emittoituvan diffuusina säteilynä tasaisesti kaikkiin suuntiin ja pinnan emissiviteetin ajatellaan olevan riippumaton säteilyn aallonpituudesta. (Vinha 2011) Harmaille pinnoille pinnan emissiviteetin ja absorptiokertoimen välille voidaan johtaa Kirchhoffin lakina tunnettu yhtälö (Vinha 2007)

$$\alpha = \varepsilon. \quad (4.13)$$

Absorptiokerroin  $\alpha$  on riippuvainen siitä onko lämpösäteily lyhytaaltoista vai pitkäaaltoista. Lyhytaaltoisen auringonsäteilyn absorptiokerroin,  $\alpha_{sol}$ , voi olla merkittäväsikin erisuuruinen pitkäaaltoisen säteilyn absorptiokertoimeen  $\alpha$  ja emissiviteettiin  $\varepsilon$  verrattuna. Auringonsäteilyn absorptiokertoimen arvo vaihtelee 0 ja 1 välillä. Lyhytaaltoisella säteilyllä pinnan vaalentuessa absorptiokerroin tavallisesti pienenee. (Vinha 2011)

Auringon pinnalta lähtevästä säteilytehosta  $E_{sol}$  vain osa tulee maan pinnalle. Auringon säteily vaikuttaa rakennuksen vaipan ulkopintaan lämmönlähteenä, joka muuttaa vaipan ulkopinnan lämpötilaa. Ilmakehän ulko-osiin tuleva säteitä vastaan kohdistuoralle pinnalle kohdistuva auringon säteilyteho  $I_{sol,0}$  on keskimäärin  $1340 \text{ W/m}^2$ . Ilmakehän lävitse tuleva auringon säteilyteho  $I_{sol}$  ( $\text{W/m}^2$ ) saadaan kaavalla

$$I_{sol} = I_{sol,0} \tau^m, \quad (4.14)$$

missä  $\tau$  on ilmakehän läpäisykerroin (-), joka vaihtelee yleensä arvojen 0,62-0,81 välillä pilvisyydestä riippuen  
 $m$  on suhteellinen läpäisymassa (-).

Rakennuksen pinnalle tuleva auringon säteilyteho lasketaan suoran säteilyn ja hajasäteilyn summana. Auringon säteilyteho rakennuksen pintaan riippuu pinnan kalte-

vuudesta, rakennuksen sijainnista, ilmansuunnasta, vuodenajasta ja kellonajasta. Auringon asema määritetään auringon korkeuskulman  $\beta$  ja aurinkoatsimuutin  $\phi$  avulla. Auringon korkeuskulma mitataan vaakatasosta ja se saa arvoja välillä  $0 - 90^\circ$ . Aurinkoatsimuutti mitataan joko etelästä tai pohjoisesta lähtien. Vaipan pystysuoralle pinnalle pinnan normaalin suunnassa tuleva auringon säteilyteho  $I_{sol, N}$  ( $\text{W/m}^2$ ) saadaan ilmakehän läpäisseen auringon säteilytehon perusteella kaavalla (Vinha 2011)

$$I_{sol, N} = I_{sol} \cos \beta \cos \phi = I_{sol} \cos \nu, \quad (4.15)$$

|       |         |    |  |
|-------|---------|----|--|
| missä | $\beta$ | on | auringon korkeuskulma ( $^\circ$ )                     |
|       | $\phi$  | on | säteilyn alaisen pinnan aurinkoatsimuutti ( $^\circ$ ) |
|       | $\nu$   | on | säteilyn lankeamiskulma seinälle.                      |

Auringonsäteily, joka siroaa ja heijastuu pilvistä ja ilmakehässä olevista ainehiukkasista on hajasäteilyä eli diffuusia säteilyä. Diffuusin säteilyn aiheuttama säteilyteho voidaan arvioida erilaisista käyrästöistä. Tarkasteltavalle pinnalle tuleva auringon kokonaissäteilyn teho  $I_{sol, N+D}$  ( $\text{W/m}^2$ ) saadaan kaavasta

$$I_{sol, N+D} = I_{sol, N} + I_D. \quad (4.16)$$

Ilmakehän kautta tarkasteltavaan pintaan tuleva säteilyteho  $I_{atm}$  ( $\text{W/m}^2$ ) saadaan laskettua, kun lisätään säteilytehoon  $I_{sol, N}$  pintaan tuleva diffuusi säteily  $I_D$  ja taivaalta tuleva pitkäaaltoinen säteily  $I_{sky}$  (Vinha 2011)

$$I_{atm} = I_{sol, N} + I_D + I_{sky}. \quad (4.17)$$

Lisäämällä ilmakehän kautta tarkasteltavaan pintaan tulevaan säteilytehoon maasta ja muista kohteista heijastunut ja emittoitunut pitkäaaltoinen lämpösäteily  $I_{sur}$  ( $\text{W/m}^2$ ), saadaan laskettua pintaan tuleva kokonaissäteily  $I_{tot}$  (Vinha 2011)

$$I_{tot} = I_{atm} + I_{sur}. \quad (4.18)$$

Laskemalla vaipan ulkopinnan lähellä olevan ilman ekvivalentti ulkolämpötila,  $T_{ekv}$ , saadaan huomioitua rakennuksen vaipan ulkopinnan lämpötilaan vaikuttavat tekijät. Ekvivalentti ulkolämpötila ottaa huomioon pitkäaaltoisen lämpösäteilyn, lyhytaaltoisen säteilyn, ulkoilman konvektion ja pinnassa tapahtuvien kosteuden faasimuutosten vaikutukset. Ekvivalentti ulkolämpötila voidaan laskea stationääritilassa kaavalla (Hagentoft 2001, Vinha 2011)

$$T_{ekv} = T_e + \frac{1}{h_e} (\alpha_{sol} I_{sol, N+D} + g h_v + (T_{sky} - T_e) h_{rad, e}), \quad (4.19)$$

|       |                |    |   |
|-------|----------------|----|---|
| missä | $T_e$          | on | ulkoilman lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ , K)   |
|       | $h_e$          | on | ulkopinnan lämmönsiirtokerroin ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ )                          |
|       | $\alpha_{sol}$ | on | lyhytaaltoisen auringonsäteilyn absorptiokerroin ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ )        |
|       | $I_{sol, N+D}$ | on | ulkopintaan kohtisuorasti tuleva auringon lyhytaaltoisen säteily ( $\text{W}/\text{m}^2$ )  |
|       | $g$            | on | ulkoilmasta pintaan kondensoituva kosteusvirran tiheys ( $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ) |
|       | $h_v$          | on | veden höyrystymislämpö, $2,5 \times 10^6$ (J/kg)  |
|       | $T_{sky}$      | on | taivaan tehollinen lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ , K)                                      |
|       | $h_{rad}$      | on | ulkopinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ).                |

Kirkkaina ja pilvettöminä öinä taivaan tehollinen lämpötila voi laskea alemmas kuin ulkoilman lämpötila. Tässä tilanteessa vaipan ulkopintaan tuleva nettosäteily on negatiivinen ja lämpöä siirtyykin säteilemällä ulkopinnasta taivaalle. Tämä aiheuttaa sen, että rakennuksen vaipan ulkopinnan lämpötila laskee lämpötilaeron pyrkiessä tasoittumaan ja rakenteen pinta jäähtyy. Kirkkaalla säällä taivaan tehollisen lämpötilan  $T_{sky}$  ja ulkolämpötilan välillä on riippuvuus, joka voidaan laskea ulkoseinätarkasteluissa pystyvinnoilla kaavalla (Vinha 2011)

$$T_{sky} = 1,1 \cdot T_e - 5, \quad (4.20)$$

missä  $T_e$  on ulkoilman lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Pilvisenä päivänä tai yönä taivaan tehollinen lämpötila voidaan ajatella samaksi kuin ulkoilman lämpötila. Rakennuksen pinnan jäähtyminen ja pinnalta lähtevän lämpösäteilyn määrä riippuu siitä, kuinka paljon ilmakehässä on vesihöyryä, kuinka pilvinen taivas on ja mitä materiaalia pinta on. (Vinha 2011)

Koska pinnan ja ilman välistä lämmönsiirtoa tarkasteltaessa lämpöä ei juuri siirry johtumalla, saadaan ulkopinnan lämmönsiirtokerroin  $h_e$  yhdistämällä säteilyn ja konvektion lämmönsiirtokertoimet

$$h_e = h_{rad} + h_{conv}, \quad (4.21)$$

missä  $h_{rad}$  on ulkopinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ )  
 $h_{conv}$  on ulkopinnan konvektion lämmönsiirtokerroin ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ).

Ulkopinnan säteilyn lämmönsiirtokertoimen  $h_{rad}$  ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) arvo vaihtelee ulkoilmassa tyypillisesti 3–6  $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  ja sisäpinnassa 4,5–5,5  $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  välillä ja se voidaan laskea kaavalla

$$h_{rad} \approx 4\varepsilon_{12}\sigma \left( \frac{T_{se} + T_{sky}}{2} \right)^3, \quad (4.22)$$

missä  $\varepsilon_{12}$  on ulkopinnan ja taivaan välinen yhdistetty emissiviteetti (-)  
 $T_{se}$  on rakenteen ulkopinnan lämpötila (°C, K).

Pintojen välisen nettosäteilyn lämpövirran tiheys  $q_{rad}$  (W/m<sup>2</sup>) rakennuksen ulkoseinälle saadaan kaavasta (Nevander & Elmarsson 1994)

$$q_{rad} = h_{rad}(T_{ekv} - T_{se}), \quad (4.23)$$

missä  $h_{rad}$  on tarkasteltavan pinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin (W/(m<sup>2</sup>K)).

Säteilyn osuessa materiaalin pintaan osa säteilystä heijastuu materiaalista, osa absorboituu materiaaliin ja osa menee materiaalin läpi. Eri materiaalit absorboivat auringonsäteilyä eri tavalla ja absorboitunut säteilyn määrä riippuu materiaalin väristä ja pinnan laadusta. Auringonsäteily nostaa rakenteen pintalämpötilaa ja myös pinnan läheisen ilman lämpötilaa. Tällöin ilman kyllästysvajaus kasvaa ja rakenteen kuivuminen tehostuu. Toisaalta auringonsäteily voi myös siirtää kosteutta rakenteiden sisäosiin. Etenkin tiiliverhotuissa rakenteissa, joissa sade on kastellut verhouksen, haihtuu seinärakenteen ulko-osissa oleva kosteus auringonsäteilyn takia tuuletusrakoon ja voi kulkeutua siitä diffuusiolla seinän sisäosiin. (Mäkitalo 2012)

### 4.1.3 Konvektio

Kun lämpöenergia siirtyy liikkuvan nesteen tai kaasun mukana kuljettumalla, puhutaan konvektiosta. Rakennusfysiikassa normaalisti ilma on se aine, joka kuljettaa lämpöenergiaa. Konvektio voi olla luonnollista tai pakotettua. Luonnollinen konvektio eli vapaa virtaus aiheutuu lämpötilaerojen aiheuttamista ilman tiheyseroista. Pakotettu konvektio aiheutuu taas ulkopuolisesta voimasta, joka voi olla tuuli, painero tai esimerkiksi puhallin. (Hagentoft 2001) Lämmin ilma kohoaa harvempana ylöspäin, jolloin virtauksen aiheuttavat nostevoimat. Ulkoseinärakenteessa konvektiovirtaus johtuu pääasiassa pintojen erilaisista lämpötiloista, sisätilan alipaineisuudesta ja huokoisessa eristeessä tapahtuvasta sisäisestä konvektiosta. (Vinha 2011)

Lämmönsiirron yhteydessä virtaavassa aineessa määritellään konvektion tapahtuvan molekyylien diffuusion ja makroskooppisen aineensiirron eli advektion summana. Matalalla aineen virtausnopeudella lämmönsiirto tapahtuu pääasiassa molekyylien diffuusion vaikutuksesta. Lämmön siirtymistä voi tapahtua konvektion yhteydessä myös olosuhteista riippuen aineen faasimuutosten, kuten kosteuden kondensoitumisen tai veden kiehumisen aiheuttamana. (Vinha 2011) Konvektiivinen lämmönsiirto-

kerroin  $h_{\text{conv}}$  ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) ilmaisee lämpömäärää, joka siirtyy aikayksikössä pinta-alayksikön suuruiselta alueelta lämpötilaeron ollessa yksikön suuruinen. (Hagentoft 2001) Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen arvo riippuu pintakerroksen geometriasta ja karheudesta, siitä onko virtaus laminaarista vai turbulenttista sekä virtaavan aineen virtausominaisuuksista ja termodynaamisista ominaisuuksista. Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen likimääräiseen määrittämiseen on olemassa monia erilaisia kaavoja (Nevander & Elmarsson; Hagentoft 2001). Konvektiivinen lämpövirran tiheys  $q_{\text{conv}}$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) materiaalin pinnasta ilmaan saadaan Newtonin laista (Vinha 2007)

$$q_{\text{conv}} = h_{\text{conv}}(T_s - T_a), \quad (4.24)$$

missä  $T_s$  on materiaalin pinna lämpötila (K)  
 $T_a$  on ympäröivän ilman lämpötila (K)

Ilman tilavuusvirta  $R_a$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) huokoisen materiaalin läpi yksiulotteisessa tapauksessa saadaan kaavasta (Vinha 2007)

$$R_a = r_a A = k_a A \frac{p_1 - p_2}{d} = K_a A (p_1 - p_2), \quad (4.25)$$

missä  $k_a$  on materiaalin ilmanläpäisevyys  
 $K_a$  on materiaalin ilmanläpäisykerroin ( $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{sPa})$ )  
 $d$  on materiaalin paksuus (m)  
 $p_1 - p_2$  on paine-ero materiaalin yli (Pa)

Käytettäessä paksuja huokoisia eristysmateriaaleja ulkoseinissä niissä saattaa syntyä sisäistä konvektiota. Sisäinen konvektio johtuu pääasiassa lämpötilaerosta seinän ylä- ja alaosassa. Myös tuuli saattaa aiheuttaa seinärakenteissa sisäistä konvektiota. Sisäisessä konvektiossa paksun eristekerroksen sisällä kiertää ilmavirtaus, joka johtuu lämpötilaeroista eristekerroksen pintojen välillä. Sisäisessä konvektiossa seinärakenteissa ilma kiertää pitkin huokoisen lämmöneristeen pintoja. Sisäpinnassa ilman suunta on alhaalta ylöspäin ja ulkopinnassa suunta on ylhäältä alaspäin. Sisäisen konvektion mahdollisuus kasvaa, jos eristeet on asennettu huonosti tai epätasaisesti. Tällöin eristeiden väleissä, nurkissa ja materiaalien liitoskohdissa voi muodostua jatkuvia ilmakeinoja, jotka lisäävät sisäisen konvektion riskiä. Myös lämmöneristekerroksen paksuntaminen lisää sisäistä konvektiota. Paksuilla lämmöneristeillä sisäisen konvektion vaikutus heikentää lämmöneristeen eristävyyttä ja saattaa kuljettaa myös kosteutta eristeessä. (Vinha 2011)

Sisäinen konvektio lisää seinän läpi virtaavaa lämpömäärää huomattavasti. Tätä lämpövirtaa voidaan kuvata Nusseltin luvun  $Nu$  avulla. Nusseltin luku kuvaa konvektio- ja johtumislämmönsiirron suhdetta rakenteessa ja ilmaisee sisäisen konvektion osuu-



den koko seinärakenteen läpi virtaavasta lämpövuosta. Nusseltin luvun arvo saadaan kaavalla (Hagentoft 2001)

$$Nu = \frac{q_{cd} + q_{conv}}{q_{cd}}, \quad (4.26)$$

missä  $q_{cd}$  on johtumalla siirtyvä lämmön osuus koko lämpövirrasta tarkasteltavan kerroksen läpi (W/m<sup>2</sup>)  
 $q_{conv}$  on konvektiolla siirtyvän lämmön osuus koko lämpövirrasta tarkasteltavan kerroksen läpi (W/m<sup>2</sup>)

Sisäisen konvektion tapahtuessa pelkästään lämpötilaerojen vaikutuksesta riippuu Nusseltin luku modifioidusta Rayleighin luvusta ja se voidaan määrittää modifioidun Rayleighin luvun funktiona. Rayleighin luvun avulla voidaan arvioida pelkän lämpötilaeron aiheuttaman sisäisen konvektion suuruutta laskemalla lämmöneristekerroksen modifioitu Rayleighin luku  $Ra_m$  (-) kaavalla (SFS-EN ISO 10456; Hagentoft 2001).

$$Ra_m = \frac{\rho_a \cdot c_{pa} \cdot g \cdot \beta \cdot d \cdot k_{ins} \cdot (T^+ - T^-)}{\gamma_a \lambda_{ins}}, \quad (4.27)$$

missä  $g$  on putoamiskiihtyvyys maan pinnalla (9,81 m/s<sup>2</sup>)  
 $\beta$  on ilman tilavuuden lämpölaajenemiskerroin (1/K)  
 $d$  on lämmöneristekerroksen paksuus (m)  
 $k_{ins}$  on lämmöneristeen permeabiliteetti (m<sup>2</sup>)  
 $T^+, T^-$  on lämpötilat lämmöneristekerroksen pinnoilla (°C, K)  
 $\gamma_a$  on ilman kinemaattinen viskositeetti (m<sup>2</sup>/s)  
 $\lambda_{ins}$  on lämmöneristeen lämmönjohtavuus (W/(mK))

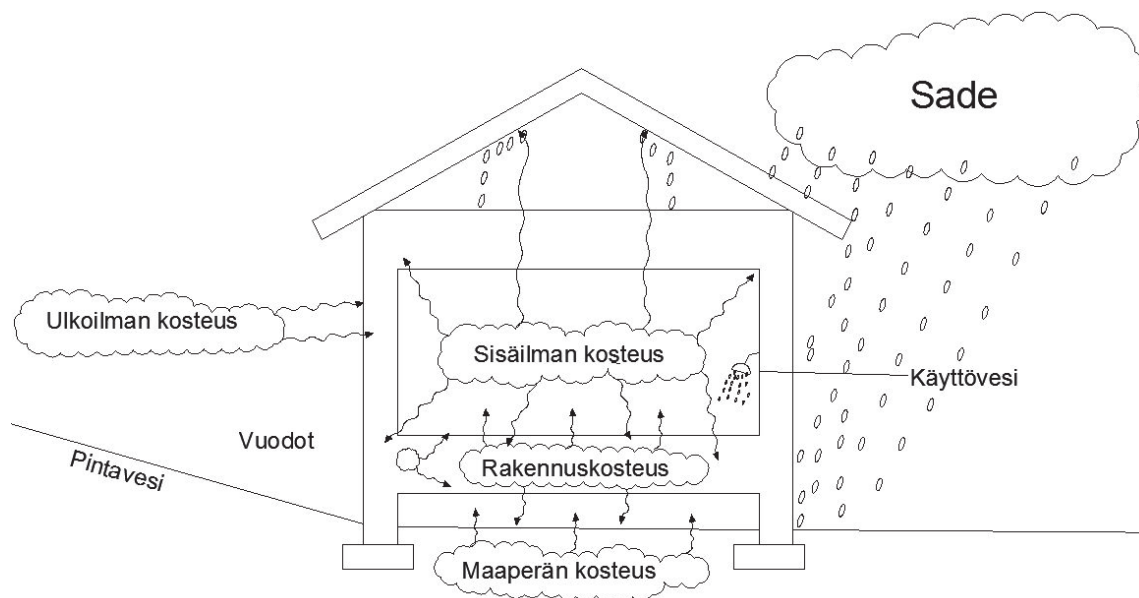
Modifioidulla Rayleighin luvulla kuvataan luonnollisen konvektion potentiaalia. Rayleighin luvun suuruus riippuu yllä olevan kaavan mukaisesti lämmöneristeen ilmanläpäisevyydestä ja paksuudesta sekä lämpötilaerosta lämmöneristekerroksen pintojen välillä. (Hagentoft 2001) Nusseltin luvun muutosta modifioidun Rayleighin luvun funktiona voidaan arvioida erilaisista käyrästäistä. (Vinha 2011) Rakentamismääräyskokoelman osassa C4 on annettu ulkoseinärakenteille ja yläpohjarakenteille modifioidun Rayleighin luvun raja-arvot, joiden ylittyessä sisäisen konvektio heikentää rakenteen lämpötekniistä toimintaa. (RakMK C4 2012)

## 4.2 Kosteus

Lämpötila vaikuttaa siihen, kuinka paljon ilmaan mahtuu vesihöyryä. Ilman kosteudesta käytetään usein nimitystä suhteellinen kosteus, joka ilmoittaa prosentteina, kuinka paljon ilmassa on tietyssä lämpötilassa vesihöyryä maksimimäärään nähden.

Kun tämä maksimimäärä ylittyy, vesihöyry tiivistyy vedeksi ja voi aiheuttaa vakavia vaurioita rakenteisiin. Kaikissa rakenteissa, ilmassa ja huokoisissa materiaaleissa on normaaliolosuhteissa jonkin verran kosteutta. Kosteuden määrään vaikuttavat materiaalin ominaisuudet, ympäröivän ilman lämpötila ja kosteuspitoisuus. Ulkoilmasta aiheutuva kosteusrasitus vaihtelee voimakkaasti vuodenajasta ja ympäristöstä riippuen.

Rakenteisiin vaikuttavia kosteuslähteitä ovat muun muassa sade, rakennekosteus, mahdolliset vuodot, ulkoilman kosteus sekä sisäilman kosteuslisä. Kosteusvaurioita rakenteisiin voi syntyä, jos rakenteet ovat pitkään kosteina tai eivät pääse kuivumaan riittävän tehokkaasti. Myös rakennusaikana, rakennusmateriaalien valmistuksesta, kuljetuksesta ja säilytyksestä sekä rakennuksen käytöstä saattaa rakenteisiin kerääntyä ylimääräistä kosteutta, joka saattaa aiheuttaa kosteusvaurioita. Kuvassa 4.2 on esitettyä rakenteisiin vaikuttavia eri kosteuslähteitä. (Siikanen 1996)



**Kuva 4.2** Ulkoseinärakenteeseen vaikuttavat kosteuslähteet. (Lähde: [www.sisäilmayhdistys.fi](http://www.sisäilmayhdistys.fi))

Rakennusten ja rakenteiden kosteustekninen toiminta on tärkeää hallita rakennusfysiikallisisissa tarkasteluissa, koska suurin osa rakennusten vaurioista on kosteuden suoraan tai välillisesti aiheuttamia. Kokemusperäisen tiedon mukaan jopa 80 % kaikista rakennusten vaurioista olisi kosteudesta johtuvia (Kääriäinen et al. 1998). Kosteusvaurioita saattaa olla sekä vanhoissa että uusissa rakennuksissa ja rakenteissa. Korkea suhteellinen kosteus rakenteen sisällä ja kosteuden kondensoituminen aikaansaavat kasvualustan homeelle ja mahdollistavat myös lahon syntymisen puurakenteissa.

Yleisimpiä syitä kosteusvaurioiden ja homevaurioiden syntymiselle ovat seuraavat tekijät: (Sisäilmayhdistys ry, Kosteusvauriot, 2008)

- Sisäilman kosteuden diffuusio rakenteen kylmiin osiin

- Kosteuden kulkeutuminen ilmavirtausten mukana rakennuksen sisältä kylmiin osiin rakennuksen ollessa ylipaineinen kylmiin tiloihin nähden
- Veden nouseminen kapillaarisesti maasta seiniin
- Vedeneristysten puutteet (etenkin märkätiloissa)
- Putkivuodot
- Ulkoseinään osuva vesisade
- Tuuletusraon huono toiminta tai tukkeutuminen
- Puutteellinen sadevedenpoistojärjestelmä ja pihamaan väärät kaadot
- Sisäilman kosteuden tiivistyminen kylmäsiltojen kohdilla ja kondensoituneen kosteuden valuminen

Kosteusvaurioituminen siis aiheutuu useimmiten suunnitteluvirheistä, suunnitelmien puuttumisesta tai rakennusvirheistä, puutteista rakentamisen laadun hallinnassa, rakennusosien vanhenemisesta sekä käyttövirheistä ja huollon puutteesta (Rakennustietosäätiö 1999). Oikeilla rakenneratkaisuilla liiallinen suhteellinen kosteus ja kosteuden kondensoituminen voidaan estää rakenteen kriittisissä pisteissä, kuten lämmöneristekerroksessa ja sen sisäpuolella sekä kantavissa rakenteissa.

Rakennusfysikaalisissa tutkimuksissa tarkastellaan fysikaalisesti sitoutunutta vettä, joka voi esiintyä rakenteissa ja rakennuksissa kolmessa eri muodossa eli näkyvänä vetenä, näkymättömänä vesihöyryinä tai rakenteisiin sitoutuneena kosteutena. (Siikaniemi 1996)

#### 4.2.1 Ilman kosteus

Ilma koostuu monista eri kaasuista, kuten typestä, hapesta, argonista ja hiilidioksidista. Ilmanpaine muodostuu kaasussa olevien eri kaasujen osapaineiden summana. Ilma voidaan olettaa ideaalikaasuksi, kun se otetaan huomioon rakennusteknisissä tarkasteluissa, jolloin myös ilmalle pätee niin sanottu yleinen kaasujen tilanyhtälö (Björkholtz 1997)

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (4.28)$$

|       |     |    |                                       |
|-------|-----|----|---------------------------------------|
| missä | $p$ | on | kaasun paine (Pa)                     |
|       | $V$ | on | kaasun tilavuus (m <sup>3</sup> )     |
|       | $m$ | on | kaasun massa (kg)                     |
|       | $M$ | on | kaasun molekyylipaino (kg/kmol)       |
|       | $R$ | on | yleinen kaasuvakio (8314,3 J/(kmolK)) |
|       | $T$ | on | lämpötila (K)                         |

Ilma sisältää myös aina jonkin verran vesihöyryä. Vesihöyryyn määrää ilmassa on mahdollista kuvata vesihöyrypitoisuutena  $v$  (kg/m<sup>3</sup>) tai vesihöyryyn osapaineena  $p_v$  (Pa). Näille saadaan yhteys ideaalikaasun tilanyhtälöllä (Vinha 2007)

$$v = \frac{p_v M_w}{RT} = \frac{M_w}{R(273.15 + \theta)} p_v, \quad (4.29)$$

missä  $M_w$  on veden molekyylipaino, 18,02 (kg/kmol)  
 $\theta$  on ilman lämpötila (°C)

Ilma voi sisältää tietyssä lämpötilassa vain tietyn määrän vesihöyryä. Tälle kosteusmäärälle käytetään nimitystä kyllästyskosteuspitoisuus  $v_{sat}$  (kg/m<sup>3</sup>) tai  $p_{v,sat}$  (Pa). Mitä pienempi on lämpötila, sitä pienempi on kyllästyskosteuspitoisuus. Näiden suhteelle ei ole täsmällistä matemaattista kaavaa, mutta kirjallisuudessa esiintyy erilaisia likiarvokaavoja. Näitä ovat esittäneet mm. Hyland & Wexler (1983) ja myös DIN 4108-5 (1981) ja EN ISO 13788 (2001) standardeissa nämä on esitetty. (Vinha 2007)

Rakennustekniikassa käytetään ilman kosteudesta yleisimmin suuretta suhteellinen kosteus. Suhteellinen kosteus kertoo absoluuttisen vesihöyrypitoisuuden (paineen) ja kyllästyskosteuspitoisuuden (kyllästyspaineen) välisen suhteen. Suhteellinen kosteus kuvaa, kuinka lähellä kastepistettä ollaan ja se voidaan laskea kaavalla

$$\varphi = 100 \frac{p_v}{p_{v,sat}}, \quad \varphi = 100 \frac{v}{v_{sat}} \quad (4.30)$$

Suhteellinen kosteus ilmaistaan prosentteina eikä sen arvo voi koskaan ylittää 100 %. (Siikanen 1996) Lämpötilan ollessa alle 0 °C, ilman kyllästyskosteuspitoisuus on erilainen riippuen siitä, tarkastellaanko tilannetta nestemäisen veden vai jääkerroksen yläpuolella (Vinha 2007). Rakennusfysiikan sovelluksissa ja ohjelmissa käytetään tyypillisesti jääkerroksen yläpuolella vallitsevia arvoja.

#### 4.2.2 Sisäilman kosteuslisä

Rakennuksiin vaikuttaa ulkoilmasta tulevan kosteuden lisäksi aina rakennuksen käytöstä johtuva sisäilman kosteuslisä  $\Delta v$  (kg/m<sup>3</sup>). Tällä kosteuslisällä tarkoitetaan sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuuksien eroa. Sisäilman kosteuslisä tulee tuntee etenkin rakenteiden diffuusio- ja konvektiotarkasteluissa. Tämä kosteuslisä voidaan laskea kaavalla

$$\Delta v = \frac{G}{nV}, \quad (4.31)$$

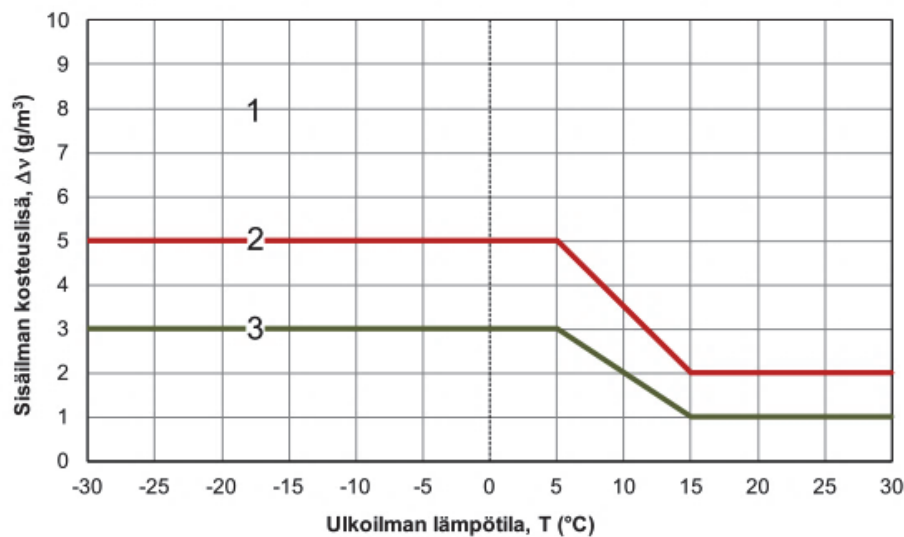
missä  $G$  on kosteustuotto sisäilmaan (kg/h)  
 $n$  on ilmanvaihtokerroin (1/h)  
 $V$  on rakennuksen sisätilavuus (m<sup>3</sup>)

Sisäilman vesihöyrypitoisuus voidaan tällöin laskea kaavasta

$$v_i = v_e + \frac{G}{nV}, \quad (4.32)$$

missä  $v_i$  on sisäilman vesihöyrypitoisuus ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $v_e$  on ulkoilman vesihöyrypitoisuus ( $\text{kg/m}^3$ )

Kaavaa on mahdollista käyttää, jos sisäilmaan tuleva kosteustuotto ei riipu merkittävästi sisäilman suhteellisesta kosteudesta. Tavallisesti oletetaan kuitenkin vakiokosteuslisä ulkoilman vesihöyrypitoisuuden lisäksi. Asuintaloissa kosteuslisän määrä on noin  $1\text{--}5 \text{ g/m}^3$ . Hyvänä mitoitusarvona voidaan käyttää vakioarvoa  $5 \text{ g/m}^3$ . TTY ja TKK ovat tehneet vuosina 2002–2008 yhteistyössä tutkimuksen, jossa on määritetty suomalaisten asuinrakennusten sisäilman lämpötilaa ja kosteusolosuhteita pitkäaikaisilla seurantamittauksilla. Tutkimuksen perusteella on RIL 107:ään (2012) saatu sisäilman kosteuslisän ja lämpötilan mitoitusarvot käyttöolosuhteissa erilaisissa rakennuksissa Suomessa. Kuvassa 4.3 on esitettyinä nämä sisäilman kosteuslisän ja lämpötilan mitoitusarvot erilaisissa rakennuksissa. (Vinha et al. 2013)



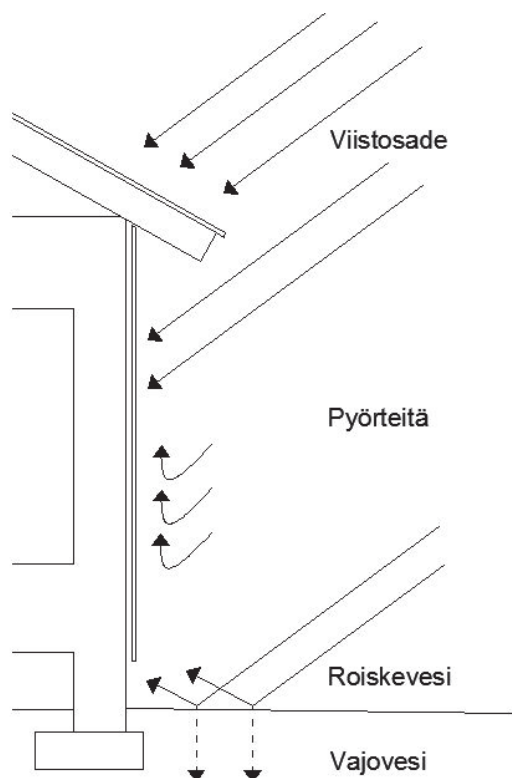
**Kuva 4.3** Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot eri kosteusluokissa. (Lähde: RIL 107 2012)

Kuvan 4.3 mukaisesti kosteuslisän mitoitusarvo on talvella  $5 \text{ g/m}^3$  ja kesällä  $2 \text{ g/m}^3$  kosteusluokassa 2. Tällä välillä kosteuslisän arvo muuttuu lineaarisesti lämpötilan mukaan. Kosteusluokan 2 rakennuksia ovat muun muassa asuinrakennukset, joita tässä työssä tarkastellaan, sekä toimisto- ja liikerakennukset, hotellit sekä majoitusrakennukset. Kosteusluokan 1 rakennuksia ovat esimerkiksi kylpylät, uimahallit ja pesulat. Kosteusluokan 3 rakennuksia ovat esimerkiksi vapaa-ajan asunnot, puoli-lämpimät rakennukset sekä varastot. Eri kosteusluokkiin kuuluvat rakennukset ja tarkemmat mitoitusarvot on määritetty kirjassa RIL 107–2012 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet (2012).

### 4.2.3 Sade

Sadetta esiintyy kolmessa muodossa: vetenä, räntänä ja lumena. Sade on kaikkein selkein rakennuksiin kohdistuva kosteusrasitus, ja räntäsade on kaikkein kastelevin sateen muoto. Räntä voi jäädä pitkäksi ajaksi vaikuttamaan loiville ja vaakasuorille pinnoille. Yleisin sateen muoto Suomessa on niin sanottu pystysade, mutta seinärakenteiden kannalta merkittävin sateen muoto on pystysateen vaakakomponentin eli viistosateen intensiteetti. Viistosade on yksi eniten kosteusvaurioita aiheuttava tekijä rakennuksissa. (Siikanen 2014)

Noin puolet koko vuoden sademäärästä sataa syksyllä. Koko sateen määrästä noin 20 - 30 % sataa viistosateena. Etelään ja lounaaseen päin olevat julkisivut ovat alttiimpia kovimmille saderasituksille, koska tuulet puhaltavat useilla paikkakunnilla syksyllä näistä ilmansuunnista. Viistosateen määrä riippuu paljon tuulen voimakkuudesta ja sen rasittava vaikutus on tämän vuoksi suurempi saaristossa ja rannikolla kuin sisämaassa. Viistosateen rasitukseen vaikuttavat lähiympäristön puut ja rakennukset sekä rakennuksen muoto ja korkeus. Viistosade vaikuttaa voimakkaimmin korkeiden rakennusten yläosiin ja nurkkiin. Pienissä taloissa ja korkeiden rakennusten keskiosissa viistosateen rasitus on pienempi. Seinän yläosaan tulee noin puolet vapaan viistosateen määrästä. Tämä kertoo siitä, että räystäiden vaikutus on erittäin suuri ja pientaloissa räystäät voivat jopa estää seinän kastumisen kokonaan. (Björkholtz 1997) Kuva 4.4 havainnollistaa viistosateen osumista rakennukseen. (Siikanen 2014)



**Kuva 4.4** Viistosateen osuminen rakennukseen. (Siikanen 2014)

Viistosateen vaikutus ja veden liikkuminen rakenteen pinnoilla riippuvat rakenteen pintamateriaalin vedenimukyvyistä ja tuulen voimakkuudesta. Rakenteen vedenimukyvyn ollessa suuri viistosade imeytyy helposti rakenteeseen ja ulkoseinän pinnalle ei synny niin helposti yhtenäistä vesikalvoa. Kalvo syntyy vasta, kun ainekerroksen huokokset ovat täyttyneet vedellä. Vesikalvon synnyttyä rakenteen pintaan alkaa tuuli painaa vettä rakenteessa olevista raoista ja halkeamista. Veden pääsy seinään voidaan estää tuuletusraolla verhouksen ja lämmöneristeen välissä. Rakennusmateriaaleja, jotka imevät viistosateen itseensä, ovat tiilet, rappaus, kevytbetoni, kevytsorabetoni, puu ja betoni. Jos puu on kuitenkin maalattu tiiviillä maalipinnoitteella, lasketaan se tiiviisiin pintamateriaaleihin. Tiiviiden pintamateriaalien pinnalle vesikalvo syntyy heti viistosateen alkaessa. (Björkholtz 1997) Mahdollinen sadevesien roiskuminen ja lammikoituminen saattavat aiheuttaa kosteusrasitusta seinien alaosissa. Tuuli voi myös aiheuttaa sen, että rakennuksen seinän vieressä syntyy pyörteitä ja sadevesi tai lumi voi nousta ylöspäin julkisivun pintaverhoukseen ulkopinnassa. (Siikanen 1996)

### 4.3 Kosteuden siirtymismuodot

Kosteuden siirtyminen rakenteessa tapahtuu vesihöyrynä tai vetenä. Liikkumiseen kosteus tarvitsee jonkun potentiaalin. Kosteuden liikkuminen rakenteessa vesihöyrynä tapahtuu seuraavilla tavoilla: (Björkholtz 1997)

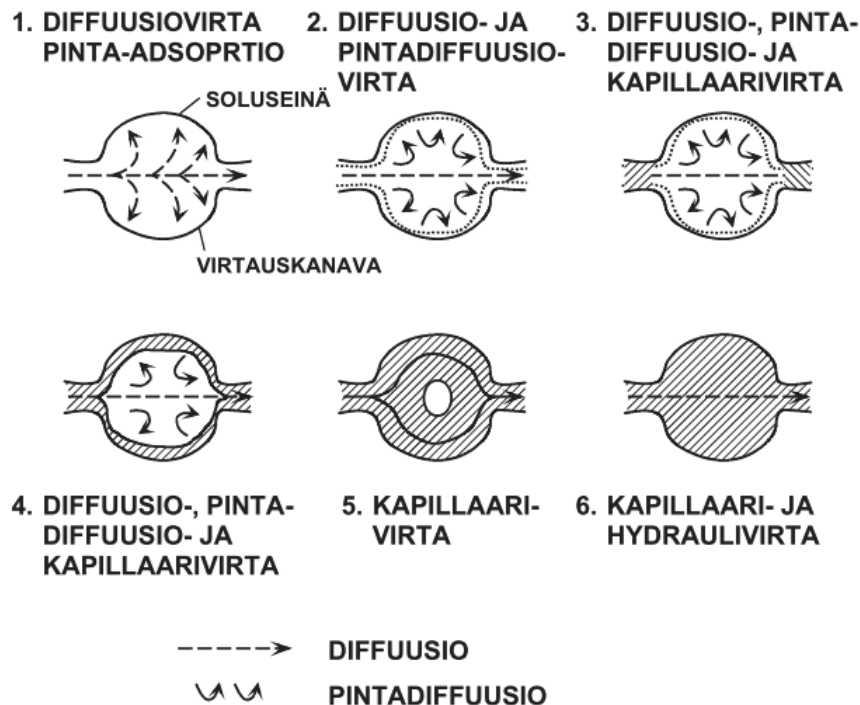
- Diffuusiolla, jolloin vesimolekyylit siirtyvät suuremmasta pitoisuudesta pienempään
- Konvektiolla, jolloin vesihöyryä siirtävänä aineena toimii ilma
- Pintadiffuusiolla
- Effuusiolla ja
- Termodiffuusiolla

Effuusio ja termodiffuusio ovat diffuusion eri muotoja. Effuusion ja termodiffuusion vaikutukset kosteuden siirtymiseen ovat merkityksettömän pieniä, jos niitä verrataan diffuusion aiheuttamiin kosteuden liikkeisiin. Tämän takia rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa effuusion ja termodiffuusion vaikutukset jätetään normaalisti huomioimatta.

Kosteuden liikkuminen rakenteessa nesteinä tapahtuu seuraavasti: (Björkholtz 1997)

- Kapillaari-imun vaikutuksella
- Painovoimaisesti siirtymällä
- Paineenalaisella siirtymisellä

Useimmiten rakenteessa kosteus siirtyy kuitenkin usean eri tavan yhteisvaikutuksella. Rakenteessa kosteus saattaa liikkua samanaikaisesti sekä vesihöyryinä että nesteenä. Kuvassa 4.5 on esitettyä kosteuden liikkumisen eri vaiheet materiaalin huokosverkostossa.



**Kuva 4.5** Kosteuden siirtymismuodot. (Ojanen et al. 1989)

Ilmassa oleva vesihöyry kulkeutuu rakenteisiin joko diffuusion avulla tai konvektion avulla. Vesihöyryn osapaine-ero saa aikaan diffuusion. Konvektio syntyy rakenteen eri puolilla vallitsevan ilmanpaine-eron aiheuttaman ilmavirtauksen takia. (Siikanen 1996)

#### 4.3.1 Vesihöyryn diffuusio

John Daltonin vuonna 1802 keksimän osapainelain mukaan epämääräisesti jakautuneet kaasumolekyylit pyrkivät liikehtimään siten, että syntyy kaasuseos, joka on tasaisesti jakautunut. Tätä liikehdintää kuvataan diffuusiolla. Diffuusiolla kaasun (ilman) liikehdintä tapahtuu korkeammasta vesihöyrypitoisuudesta matalampaan, eli alenevan höyrynpaineen suuntaan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että lämpötila-eron alaisessa rakenteessa vesihöyryn diffuusio suuntautuu lämpimältä puolelta kylmälle puolelle (RIL107-2000). Rakennusteknisissä tarkasteluissa tärkein kaasu on vesihöyry ja diffuusiolla tarkoitetaan tavallisesti vesihöyryn liikkumista rakenteen läpi. Rakenteen yli vallitsevan vesihöyryn osapaine-eron tasaantumisenopeus riippuu rajapinnan diffuusiovastuksesta. (Björkholtz 1997)

Diffuusio syntyy, kun sisä- ja ulkoilman välillä on vesihöyrypitoisuuksien ero. Kyseessä oleva potentiaali voidaan lausua vesihöyrypitoisuuserona  $\Delta v$  (kg/m<sup>3</sup>) tai vesi-



höyryn osapaine-erona  $\Delta p$  (Pa). Vesihöyryn diffuusiolla siirtyvä kosteusvirran tiheys,  $g$  (kg/(m<sup>2</sup>·s)), homogeenisessa ainekerroksessa saadaan Fickin lain avulla kaavalla (Björkholtz 1997)

$$g = -\delta_v \nabla v = -\left(\delta_v \frac{\partial v}{\partial x}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial y}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial z}\right), \quad (4.33)$$

missä  $\delta_v$  on aineen vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmaistuna (m<sup>2</sup>/s)  
 $v$  on vesihöyrypitoisuus (kg/m<sup>3</sup>)  
 $x, y, z$  on kosteusvirran suuntakoordinaatit (m)

Sama kaava vesihöyrynosapaineiden avulla esitettynä saa muodon

$$g = -\delta_p \nabla p_v = -\left(\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial y}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial z}\right) \quad (4.34)$$

missä  $\delta_p$  on aineen vesihöyrynläpäisevyys osapaine-eron avulla ilmaistuna (kg/(m·s·Pa))  
 $p_v$  on vesihöyryn osapaine (Pa)

Kosteusvirran tiheys yksiulotteisessa tapauksessa materiaalikerroksen läpi jatkuvuus-tilassa, vesihöyrypitoisuusjakauman ollessa lineaarinen, saadaan laskettua kaavasta (Vinha 2011)

$$g = -\delta_v \frac{v_2 - v_1}{d} = \delta_v \frac{v_1 - v_2}{d}, \quad (4.35)$$

missä  $v_1, v_2$  on vesihöyrypitoisuudet materiaalikerroksen eri puolilla (kg/m<sup>3</sup>)  
 $d$  on materiaalikerroksen paksuus (m)

Vesihöyrypitoisuuseron lisäksi materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vaikuttaa rakenteen ja materiaalin läpi siirtyvään vesihöyryn määrään. Vesihöyrynläpäisevyys tarkoittaa aineen ominaisuutta päästää lävitseen vesihöyryä. Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys on riippuvainen lämpötilasta ja huokosilmassa vallitsevasta suhteellisesta kosteudesta ja se on tietyn paksuisen ainekerroksen ominaisuus. Diffuusiolaskelmat voidaan tehdä vesihöyryn osapaine-eroihin perustuen tai vesihöyryn pitoisuuseroihin perustuen, mutta laskelmissa tulee huolehtia siitä, että käytetään siirtävää potentiaalia vastaavaa vesihöyrynläpäisevyyttä. (Siikanen 1996) Vesihöyrynläpäisevyys on mahdollista mitata ns. kuppikokeella, esimerkiksi standardin SFS-EN ISO 12572 (2001) mukaisesti. Vesihöyrypitoisuuseron avulla ja vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistujen vesihöyrynläpäisevyyksien suhde voidaan laskea ideaalikaasujen tilanyhtälön avulla seuraavasti

$$\delta_v = \frac{R(273,15+\theta)}{M_w} \delta_p \quad (4.36)$$

Materiaalien vesihöyrynläpäisevyyksiä löytyy muun muassa julkaisuista Hagentoft (2001), Siikanen (1996), Björkholtz (1997) sekä Rakennusfysiikan käsikirja (2014). Vesihöyrynläpäisevyyttä voidaan kuvata myös ns. diffuusiovastuskertoimen avulla. Diffuusiovastuskertoimella kuvataan materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden suhdetta ilman vesihöyrynläpäisevyyteen. Diffuusiovastuskertoimella siis kuvataan, kuinka paljon suurempi diffuusiovastus materiaalilla on vastaavan paksuiseen ilmakerrokseen verrattuna samassa lämpötilassa. Ilman diffuusiovastuskerroin  $\mu = 1$ . Diffuusiovastuskerroin  $\mu$  lasketaan kaavasta (SFS-EN ISO 12572 2001)

$$\mu = \frac{\delta_{p,a}}{\delta_p} \quad \text{tai} \quad \mu = \frac{D_a}{\delta_v}, \quad (4.37)$$

missä  $D_a$  on ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla ilmaistuna ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $\delta_{p,a}$  on ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna ( $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ )

Kun tunnetaan materiaalin diffuusiovastuskerroin, voidaan laskea myös materiaalin suhteellinen diffuusiovastus  $s_d$  (m), kun tiedetään materiaalikerroksen paksuus

$$s_d = \mu \cdot d \quad (4.38)$$

Ilman vesihöyrynläpäisevyys on riippuvainen lämpötilasta ja ilmanpaineesta. Ilman vesihöyrynläpäisevyys voidaan laskea esimerkiksi kaavan 4.39 mukaisesti. Kaavalla lasketaan ilman vesihöyrynläpäisevyys normaalissa ilmanpaineessa standardin DIN 52715 mukaisesti. (Künzel 1995)

$$\delta_{p,a} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot T^{0,81}}{P_n}, \quad (4.39)$$

missä  $T$  on ilman lämpötila (K)  
 $P_n$  on normaali ilmanpaine 101 325 Pa

Jos materiaali on niin ohut, että sen paksuutta ei saada määritettyä tarkasti, ilmoitetaan materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrynvastuksena  $Z_v$  (s/m) tai  $Z_p$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ). Nämä kaksi kuvaavat tietyn materiaalikerroksen tai tuotteen vesihöyryn virtausta vastustavaa ominaisuutta ja ne voidaan laskea seuraavilla kaavoilla (Vinha 2007)

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad \text{tai} \quad Z_p = \frac{d}{\delta_p}, \quad (4.40)$$

missä  $d$  on materiaalin paksuus (m)

Rakenteen tai materiaalin pinnan vesihöyrynvastus voidaan laskea kaavalla (Vinha 2011)

$$Z_{v,s} = \frac{1}{\beta_v}, \quad (4.41)$$

missä  $\beta_v$  on pinnan kosteudensiirtokerroin (m/s)

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa ulkopinnan vesihöyrynvastukselle käytetään usein arvoa 60 s/m ja sisäpinnan vesihöyrynvastukselle arvoa 360 s/m. Pinnan kosteudensiirtokerroin,  $\beta_v$  (m/s), saadaan Lewisin yhtälön avulla kaavalla (Vinha 2011)

$$\beta_v = \frac{h_{conv}}{\rho_a c_{pa}}, \quad (4.42)$$

missä  $h_{conv}$  on pinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin (W/(m<sup>2</sup>K))

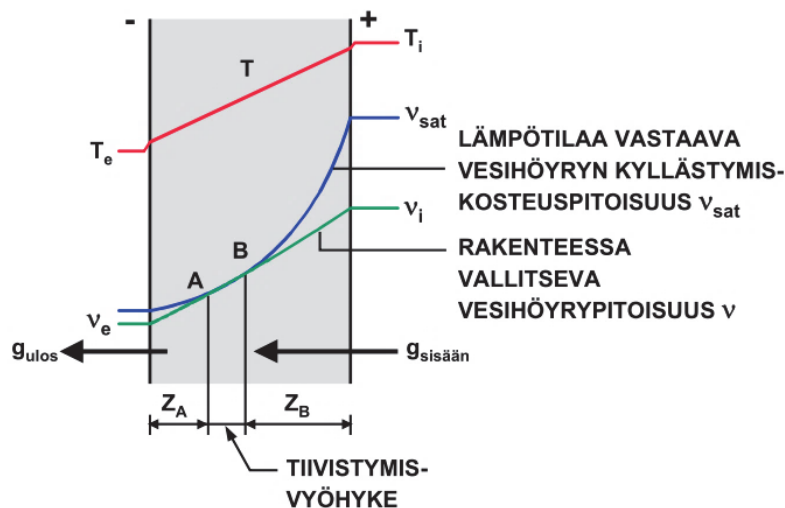
Vesihöyrynvastus voidaan ajatella käänteisenä suureena vesihöyrynläpäisevyydelle. Vesihöyrynvastus on siis rakenneominaisuus, kun taas vesihöyrynläpäisevyys on materiaaliominaisuus. Materiaalin vesihöyrynläpäisykerroin,  $W_v$  (m/s), taas saadaan laskettua vesihöyrynvastuksen  $Z_v$  (s/m) käänteislukuna. Laskettaessa diffuusiokosteuden liikkumista ja sen mahdollista tiivistymistä rakenteissa tulee tuntee ainekerrosten vesihöyrynvastukset, lämpötilat rakenteiden eri kerroksissa, lämpötiloja vastaavat kyllästymispaineet sekä ilman suhteellinen kosteus rakenteen eri puolilla. (Siikanen 1996) Diffuusiiovirta aiheuttaa kosteuden kondensoitumista, jos huokosilman kosteuspitoisuus rakenteen jossakin kohdassa ylittää kyseisen kohdan lämpötilaa vastaavan kyllästyskosteuden. Jos kosteuden kondensoitumiselle suotuisat olosuhteet jatkuvat, lisääntyy tiivistyvän kosteuden määrä jatkuvasti. Tämän vuoksi kosteuden kondensoituminen rakenteissa pyritään estämään suunnittelemalla rakenteet oikein.

Diffuusiiovirran aiheuttama kondenssi on mahdollista laskea. Laskelmin voidaan tarkastella syntykö kondenssia kylmissä oloissa ja jos syntyy, niin kuinka paljon kosteutta kondensoituu. Laskuja tehtäessä vuosi jaetaan kahteen osaan, jotka ovat tiivistymisjakso ja kuivumisjakso. Laskelmilla voidaan tarkastella, mikä on rakenteeseen tiivistyvän kosteuden määrä esimerkiksi vuoden kahden kylmimmän kuukauden aikana ja toisaalta taas, kuinka paljon rakenne pystyy kuivattamaan kosteutta kahden lämpimimmän kuukauden aikana. (Vinha 2011) Lämpötilana käytetään tiivistymisjakson aikana kylmimmän kahden kuukauden lämpötilojen keskiarvoa ja vastaavasti kuivumisjaksona lämpimimmän kahden kuukauden keskiarvoja (Björkholtz 1997). Laskelmin voidaan myös tarkastella tiivistyvän kosteuden määrää suhteessa rakenteen osan kosteudensitomiskykyyn ja sitä, onko tämä kosteuspitoisuus tietyllä rakenteosalla haitallinen. Laskuissa olosuhteiden oletetaan olevan stationääritilassa ja kosteuden sitoutumista rakennekerrokseen ei oteta huomioon. (Vinha 2011) Diffuusiovir-

ran aikayksikössä aiheuttaman kondensoituneen kosteuden määrä,  $g_{cond}$  (kg/(m<sup>2</sup>·s)), neliölle kuvassa 4.6 rakenteen sisällä olevan alueen A-B välillä voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Vinha 2011)

$$g_{cond} = \frac{v_i - v_B}{Z_{v,B}} - \frac{v_A - v_e}{Z_{v,A}}, \quad (4.43)$$

|       |           |    |   |
|-------|-----------|----|---|
| missä | $Z_{v,B}$ | on | sisäilman ja kohdan B välisten materiaalikerrosten vesi höyrynvastusten summa (s/m) |
|       | $Z_{v,A}$ | on | ulkoilman ja kohdan A välisten materiaalikerrosten höyrynvastusten summa (s/m)      |
| vesi  | $v_i$     | on | sisäilman vesihöyrypitoisuus (kg/m <sup>3</sup> )                                   |
|       | $v_e$     | on | ulkoilman vesihöyrypitoisuus (kg/m <sup>3</sup> )                                   |
|       | $v_A$     | on | pisteen A vesihöyrypitoisuus (kg/m <sup>3</sup> )                                   |
|       | $v_B$     | on | pisteen B vesihöyrypitoisuus (kg/m <sup>3</sup> )                                   |



**Kuva 4.6** Lämpötila ja kosteusjakauma homogeenisessä seinässä. (Vinha 2011)

Kaavan 4.43 ensimmäisellä termillä ilmoitetaan sisältä rakenteeseen tuleva kosteus. Jälkimmäinen termi ilmoittaa samanaikaisesti tiivistymiskohdasta ulos diffundoituvan kosteuden määrän. Kun nämä erotetaan toisistaan, saadaan seinään kondensoituva kosteusvirran tiheys. (Björkholtz 1997) Rakenteeseen kondensoituvan kosteuden määrä  $m''_{cond}$  (kg/m<sup>2</sup>) saadaan kaavasta

$$m''_{cond} = g_{cond} \cdot t_{cond}, \quad (4.44)$$

missä  $t_{cond}$  on kondensoitumisjakson pituus (s)

Kosteuden kuivuminen aikayksikössä neliöltä,  $g_{dry}$  (kg/(m<sup>2</sup>·s)), saadaan laskettua kaavalla

$$g_{dry} = \frac{v_A - v_e}{Z_{v,A}} - \frac{v_B - v_i}{Z_{v,B}}, \quad (4.45)$$

Kaavan 4.45 ensimmäisellä termillä kuvataan rakenteen kuivumista tiivistymiskohdasta ulospäin ja jälkimmäisellä termillä kuvataan kuivumista tiivistymiskohdasta sisäänpäin. Tämän kaavan avulla saadaan laskettua rakenteesta kuivuvan kosteuden määrä,  $m''_{dry}$  (kg/m<sup>2</sup>), kaavalla

$$m''_{dry} = g_{dry} \cdot t_{dry}, \quad (4.46)$$

missä  $t_{dry}$  on kuivumisjakson pituus sekunteina

Käytännön tilanteissa kosteutta kondensoituu yleensä kahden materiaalin rajapintaan, jolloin kaavoissa käytetyt kohdat A ja B yhdistyvät. Rakenteita suunniteltaessa vaatimuksena on, että kuivuvan kosteuden määrä on selvästi suurempi kuin kondensoituvan kosteuden määrä. Laskentatarkasteluihin tarvitaan lämpötiläkäyrät tiivistymis- ja kuivumiskausilla rakenteen läpi sekä lämpötiloja vastaavat kyllästyskosteuspitoisuudet ja tarkastelukausten ulko- ja sisäilmojen suhteelliset kosteudet. (Vinha 2011)

### 4.3.2 Kosteuden konvektio

Vesihöyryn siirtyessä ilmapirran mukana siirtymistä kutsutaan kosteuden konvektioksi. Lämmönsiirron laskennalliset konvektiotarkastelut ja kosteuden laskennalliset konvektiotarkastelut ovat analogisia keskenään. Kosteuden konvektiotarkastelut poikkeavat lämmön konvektiotarkasteluissa kuitenkin siten, että kosteus voi kondensoitua rakenteeseen tilanteessa, jossa ilman vesihöyrypitoisuus saavuttaa kyllästyskosteuspitoisuuden. Ilmavirtauksien synnyn edellytyksenä ovat rakenteen eri puolilla vallitsevat erilaiset ilman kokonaispaineet. Paine-eroja synnyttävät muun muassa tuuli, lämpötilaerot, ilmanvaihtojärjestelmät sekä puhaltimet. Kun ilmavirtaus liikkuu epätiiviin rakenteen läpi lämpimästä sisäilmasta kylmään ulkoilmaan, ilma jäähtyy. Tämän seurauksena voi tapahtua kosteuden tiivistymistä rakenteisiin ja kosteutta voi kertyä rakenteisiin haitallisia määriä. Kun ilmavirta liikkuu ulkoa sisälle päin, se lämpenee ja kuivattaa rakennetta, koska virtaavan ilman kosteudensitomiskyky kasvaa. (Björkholtz 1997)

Kosteutta kuljettavaa konvektiovirtausta voi esiintyä seinän sisäisenä niin sanottuna luonnollisena konvektiona, joka johtuu ilman tiheyseroista. Luonnollista konvektiota esiintyy erityisesti pystyrakenteissa, mutta sitä voi esiintyä myös ullakotiloissa. Konvektiovirtausta tapahtuu myös rakenteessa olevien rakojen ja reikien kautta ilmanpaine-erojen vaikutuksesta ns. pakotettuna konvektiona. Kylminä vuodenaikoina rakenteiden toimivuuden kannalta suurin merkitys on rakojen, reikien ja halkeamien läpi kulkeutuvilla ilmavirroilla. Nämä ilmavirrat voivat kuljettaa moninkertaisia kosteusmääriä rakenteisiin diffuusioon verrattuna. (Siikanen 2014) Konvektiolla siirty-

vän kosteusvirran tiheyden nettoarvo,  $g_{conv}$  (kg/(m<sup>2</sup>·s)), ilma- tai reiän läpi saadaan kaavalla (Vinha 2007)

$$g_{conv} = r_a(v_1 - v_2), \quad (4.47)$$

missä  $r_a$  on ilmavirran tiheys (m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s))  
 $v_1, v_2$  on vesihöyrypitoisuudet rakenteen eri puolilla (kg/m<sup>3</sup>)

Konvektion avulla siirtyvä kosteusvirta,  $G_{conv}$  (kg/s), voidaan laskea kaavalla

$$G_{conv} = R_a(v_1 - v_2), \quad (4.48)$$

missä  $R_a$  on raon läpi siirtyvän ilman tilavuusvirta (m<sup>3</sup>/s)

Tilanteessa, jossa rakenteen pintojen välillä on lämpötilaero, osa konvektiolla raon läpi siirtyvästä kosteudesta voi kondensoitua rakenteeseen. Jos ilmavirtaus rakenteen läpi tapahtuu lämpimältä puolelta kylmälle puolelle, saattaa rakenteen ulkopinnan lähelle kondensoitua vettä. Jotta kondensoitumista tapahtuisi, tulee rakenteeseen virtaavan lämpimän sisäilman vesihöyrypitoisuuden olla rakenteen kylmän pinnan huokosilman kyllästyskosteuspitoisuutta suurempi. Rakenteeseen virtaava kondensoituvan kosteuden enimmäismäärä,  $G_{cond}$  (kg/s), voidaan laskea kaavalla (Vinha 2011)

$$G_{cond} = R_a(v_i - v_{sat, mat(T-)}), \quad (4.49)$$

missä  $v_i$  on rakenteeseen virtaavan lämpimän sisäilman vesihöyrypitoisuus (kg/m<sup>3</sup>)  
 $v_{sat, mat(T-)}$  on huokosilman kyllästyskosteuspitoisuus rakenteen kylmässä pinnassa (kg/m<sup>3</sup>)

Tilanteessa, jossa ilmavirtaus tapahtuu kylmältä puolelta lämpimälle puolelle, saattaa materiaalikerros kuivua. Jotta materiaalikerros pääsee kuivumaan, tulee huokosilman vesihöyrypitoisuus materiaalin lämpimässä pinnassa olla suurempi kuin rakenteeseen virtaavan kylmemmän ulkoilman vesihöyrypitoisuuden. Rakenteesta poistuva kosteusvirta,  $G_{dry}$  (kg/s), voidaan laskea kaavalla (Vinha 2011)

$$G_{dry} = R_a(v_{mat(T+)} - v_e), \quad (4.50)$$

missä  $v_e$  on rakenteeseen virtaavan kylmemmän ulkoilman vesihöyrypitoisuus (kg/m<sup>3</sup>)  
 $v_{mat(T+)}$  on huokosilman vesihöyrypitoisuus materiaalin lämpimässä pinnassa (kg/m<sup>3</sup>)

Kun tarkkaillaan yksiulotteista kosteuden konvektiota huokoisen ja homogeenisen materiaalikerroksen läpi stationääritilassa, tulee ottaa huomioon yhdistetty konvektion ja diffuusion aiheuttama kosteuden siirtyminen. Tämä johtuu siitä, että ilman virratessa huokoisen materiaalin läpi osa vesihöyrystä siirtyy materiaalin läpi diffuusiolla. (Vinha 2007)

Sen lisäksi, että sisäinen konvektio lisää merkittävästi lämpövirtaa ulkoseinärakenteen läpi, se pyrkii myös siirtämään seinärakenteessa kosteutta seinän yläosaan ja kylmempään pintaan. Tämä lisää kosteuden kondensoitumista ja homeen kasvun mahdollisuutta seinärakenteen yläosissa. Sisäinen konvektio jäähdyttää mahdollisesti myös höyrynsulun ulkopintaa rakenteen alaosassa, jolloin kosteuden kondensoitumisen riski ja homeen kasvun mahdollisuus lisääntyy myös höyrynsulun sisäpinnassa. Sisäisen konvektion vaikutuksia voidaan vähentää ja estää asentamalla lämmöneristeet ja tuulensuoja tiiviisti muihin rakenteisiin. Myös konvektiokatkoilla voidaan vähentää sisäistä konvektiota. Konvektiokatkot voidaan toteuttaa asentamalla lämmöneristekerroksen yläosiin tai koko rakenteeseen pystysuuntaisia vesihöyryä vastustavia konvektiokatkoja. (Vinha 2007) Sisäinen konvektio tulee tarvittaessa ottaa huomioon rakenteen diffuusiotarkastelussa esimerkiksi mitoittamalla rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastus riittävän suureksi. (Vinha 2011)

#### **4.3.3 Kapillaarinen kosteuden siirtyminen**

Rakennusaineiden ja maaperän kykyä imeä vettä itseensä ollessaan kosketuksissa veden kanssa kutsutaan kapillaarisuudeksi. Esimerkiksi sadevedet, pohjavesi sekä sulamis- ja valumavedet voivat siirtyä kapillaarisesti rakenteisiin ja aiheuttaa niissä kosteusongelmia. (Björkholtz 1997) Kapillaarivirtaus syntyy, kun vesi pyrkii nousemaan materiaalin huokosissa nesteen sisäisen koheesion sekä nesteen ja huokosen seinämän välisen adheesion avulla. Tästä johtuen veden pinta kaareutuu huokosessa ja veden pintaan muodostuu pintajännitys. Pintajännityksen takia veden pinnan ja huokosessa olevan ilman välille syntyy paine-ero, jota kutsutaan huokosalipaineeksi (Pa). Vesi nousee huokosputkessa huokosalipaineen avulla korkeuteen, joka on tasapainossa huokosputkessa olevan veden synnyttämän hydrostaattisen paineen kanssa. (Vinha 2011)

Kosteus siirtyy siis kapillaarisesti huokoisessa aineessa huokosalipaineen paikallisten erojen takia. Kapillaarinen kosteuden siirtyminen johtuu siitä, että rakenne ja sen eri ainekerrokset pyrkivät kapillaariseen tasapainokosteuteen. Huokoisina materiaaleina esimerkiksi puu, tiilet ja harkot kuljettavat huokosissaan vettä kapillaari-imun vaikutuksesta. Kapillaari-imu aiheuttaa myös kosteuden siirtymistä huokoisten materiaalien sisällä. Kapillaarinen kosteuden siirtyminen huokoiseen aineeseen pyritään estämään kapillaarisuuden katkaisevalla rakennusmateriaalilla, kuten muovilla tai kermillä sekä puun päätysulkemisella. Julkisivussa riittävän tiivis pintakerros estää kapillaarisen kosteuden siirtymisen. (Siikanen 2014)

## 5 MATERIAALIEN HOMEHTUMINEN

Kappaleessa 5 kerrotaan materiaalien vaurioitumisesta mikrobien ja kosteuden vaikutuksesta. Tässä kappaleessa kerrotaan myös, miten homeen kasvun riskiä rakenteissa voidaan arvioida käyttämällä VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämää parannettua homemallia. Parannetun homemallin matemaattisella mallilla voidaan arvioida rakenteiden homehtumisriskiä muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa ajan funktiona.

### 5.1 Mikrobit ja puun vaurioituminen

Rakenteiden ollessa pitkään kosteina voi rakennusosissa alkaa kasvaa home- ja lahottajasieniä sekä hiivoja ja bakteereja. Näitä nimitetään yhteisesti mikrobeiksi. (Siikainen 2014) Jos rakenteeseen kohdistuva kosteusrasitus on vain lyhytaikainen ja rakenne kuivuu muutamassa vuorokaudessa, ei kosteusrasituksesta yleensä ole haittaa. Mikrobien kasvun alkamiseen vaikuttaa eniten ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila. Materiaalissa tulee olla valmiina mikrobeja, itiöitä tai pieni määrä vanhaa kasvustoa, jotta mikrobikasvu voi alkaa. Mikrobeja elää ulkona muun muassa maaperässä, kasveissa ja vedessä. Suomessa ilmassa olevat mikrobipitoisuuksien määrät ovat riippuvaisia vuodenajasta. Talvella maan ollessa lumen peitossa ja ilman ollessa kylmä ulkoilman mikrobipitoisuudet ovat pienemmät. Paljaasta maasta tuuli ja ihmisten aiheuttamat liikkeet siirtävät mikrobeja ilmaan ja mikrobit voivat kulkeutua ilmavirtausten mukana jopa tuhansia kilometrejä. (Sisäilmayhdistys ry, Mikrobikasvun edellytykset 2008)

Rakennusten sisällä mikrobien määrään vaikuttavat muun muassa elintarvikkeet, polttopuut, huonekasvit, huonepöly, kotieläimet sekä ihmiset itse. Mikrobit voivat käyttää lähes kaikkea eloperäistä materiaalia energialähteenään. Useille mikrobeille puu, kipsilevyn pahvi, tapetti ja muut selluloosapitoiset materiaalit ovat sopivia kasvualustoja ja usein myös tavallinen huoneilmassa oleva pöly on riittävä kasvualusta. Mikrobikasvun estämisen tehokkain keino on rakennuksen pitäminen kuivana. (Sisäilmayhdistys ry, Mikrobikasvun edellytykset 2008) Arkikielessä yleisesti käytössä oleva sana home on vain yksi mikrobilaatu, joka rakennuksien homehtumisessa vaikuttaa. Myös monet muut mikrobit, homeitiöiden lisäksi, aiheuttavat ongelmia rakennuksissa. Näitä ovat esimerkiksi aktinomykeetit eli sädesienet, bakteerit, hiivat, muut sienet, kuten lahottajasienet sekä mikrobien rihmastot. Koska rakennuksen vaurioitumiseen vaikuttava home yleensä tarkoittaa muitakin mikrobeja kuin vain homeetta, olisi parempi nimittää vaurioita mikrobivaurioiksi. (Salmi et al. 1996)



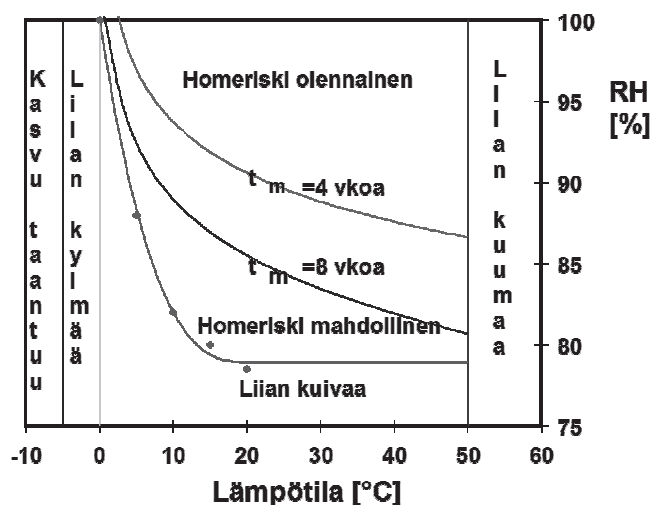
Puun homehtuminen alkaa, kun puun kosteuspitoisuus on liian korkea ja lämpötila on riittävä mikrobien kasvulle. Kun puhutaan puun kosteudesta, tarkoitetaan puussa olevan veden massan ja vedettömän puuaineksen massan välistä suhdetta. Puu on hygroskooppinen materiaali, eli puu huokoisena aineena pystyy sitomaan itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttamaan sitä myös takaisin ilmaan. Hygroskooppinen tasapainokosteus saavutetaan, kun aineen huokosissa oleva ilman suhteellinen kosteus on asettunut samaan arvoon kuin ympäröivän ilman suhteellinen kosteus. (Björkholtz 1997) Vastasahatussa puussa kosteus on yleensä 40–200 paino- %:a ja normaalikäytössä olevan puun kosteus on noin 8–25 painoprosentin välillä riippuen ilman suhteellisesta kosteudesta. Puu alkaa vaurioitua sen kosteuspitoisuuden ollessa pitkään yli 20 paino- %. Tällöin ilman kosteuspitoisuus on luokkaa 80 - 90 % RH. Puun vaurioitumiseen vaikuttaa merkittävästi myös ympäröivän ilman lämpötila. Vaikka talvella ilman suhteellinen kosteus voi olla pitkiäkin aikoja yli 85 % RH, ei lämpötila ole riittävä mikrobien kasvulle. Tällöin puu ei myöskään pääse vaurioitumaan. Myös happi ja ravinteet ovat tärkeitä homeiden ja itiöiden kasvamiselle ja näitä on yleensä homeen kasvulle riittävä määrä sekä puussa että ympäröivässä ilmassa. (Puuinfo, Puu materiaalina: kosteusteknisiä ominaisuuksia) Home ei kuitenkaan ole haitallista puun lujuuden kannalta, sillä se ei pysty tunkeutumaan puun sisälle. Homeet kuitenkin levittävät itiöitä, jotka saattavat aiheuttaa terveydellisiä haittoja ihmiselle. (RIL 107–2000)

Terveydellisiä haittoja voi aiheutua, jos kosteusvaurioituneesta rakenteesta pääsee siirtymään sisäilmaan mikrobihiukkasia tai mikrobien aineenvaihduntatuotteita. Useimmat kosteusvauriorakennuksille tyypilliset mikrobit ovat kooltaan hyvin pieniä, joten ne leijuvat helposti ilmassa ja liikkuvat sieltä limakalvoille ja hengitysteihin. Jotkut mikrobit tuottavat myös sopivissa olosuhteissa myrkkyjä, jotka aiheuttavat silmien, ihon ja hengitysteiden ärsytysoireita. Suomalaisista 1-3 %:a ovat allergisia tavallisille homesienille. Kosteusvauriorakennuksen muuttuneessa mikrobialtistuksessa allergisten määrä on vielä suurempi. Mikrobit voivat aiheuttaa ihmisille muun muassa ärsytysoireita, pahoinvointia, päänsärkyä, toistuvia infektioita, kuten nuhakuumetta ja flunssaa sekä pahimmillaan homepölykeuhkon. Tämän vuoksi homeen kasvu rakenteissa tulee estää ja etenkin rakenteen rungossa ja sen sisäpuolella, josta homeitiöiden ja mikrobien aineenvaihduntatuotteiden on helpompaa siirtyä sisäilmaan. (Sisäilmayhdistys ry, Terveysvaikutukset, 2008)

## 5.2 Parannettu homemalli

Tässä tutkimuksessa homeen kasvu on yksi rakenteiden toimintakriteeri. VTT:llä on jo 1980-luvun puolivälissä aloitettu kehittämään homehtumisriskin laskennallista mallinnusta puumateriaaleilla. Tuloksena näistä kokeista on kehitetty 1990-luvulla homeen kasvun matemaattinen malli männyn ja kuusen pintapuulle, jolla voidaan arvioida homehtumisriskiä muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa ajan funk-

tiona. (Vinha et al. 2013) Kuvassa 5.1 on esitetty homeen kasvun kannalta suotuisat lämpötila- ja kosteusolosuhteet sekä homeen kasvun alkamiseen kuluva aika  $t_m$  männyn pintapuussa.



**Kuva 5.1** Homeen kasvun kannalta suotuisat lämpö- ja kosteusolosuhteet männyn pintapuussa. (Kokko et al. 1999)

Mikrobikasvulle otollinen lämpötilaväli on  $+0...+50\text{ °C}$  ja kriittinen ilman suhteellinen kosteus mikrobikasvun alkamiselle on lämpötilan funktio. Kuvasta 5.1 nähdään, että mitä alhaisempi on ilman lämpötila, sitä korkeampi tulee kosteuspuutisuuden olla, jotta homeen kasvulle olisi suotuisat olosuhteet. (Hukka & Viitanen 1999) Kuvasta 5.1 havaitaan myös, että homeen kasvu vaatii vähintään 80 % RH suhteellisen kosteuden ympäröivässä ilmassa. Olosuhteiden ollessa riskirajalla homeen kasvu on erittäin hidasta.

Homeen kasvusta tulee ongelmia, kun ilman suhteellinen kosteus on pitkään yli 90 % RH ja lämpötila on  $+10...+50\text{ °C}$  välillä. Jos ilman lämpötila on alle  $+5\text{ °C}$ , tulee suhteellisen kosteuden olla yli 95 % RH, jotta homeen kehittyminen on mahdollista. (Kokko et al. 1999) Jos ilman suhteellinen kosteus on kriittisen rajan,  $RH_{crit}$ , alapuolella, homeen kasvu hidastuu tai pysähtyy. Kuvan 5.1 mukaisesti homeen kasvu ei ole myöskään mahdollista yli  $50\text{ °C}$  lämpötilassa tai pakkasessa. Homeen kasvun kriittistä rajakäyrää voidaan kuvata seuraavalla yhtälöllä

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0,00267T^3 + 0,160T^2 - 3,13T + 100, & \text{kun } 0^\circ\text{C} < T \leq 20^\circ\text{C} \\ 100 \%, & \text{kun } 0^\circ\text{C} \geq T \geq 50^\circ\text{C} \\ RH_{min}, & \text{kun } 20^\circ\text{C} < T < 50^\circ\text{C} \end{cases}, (5.1)$$

missä  $T$  on lämpötila ( $^\circ\text{C}$ )  
 $RH_{min}$  on suhteellisen kosteuden miniarvo (%), joka vaaditaan homekasvun alkamiseen, puulle 80 % RH.

Materiaalin homehtumista voidaan kuvata homeindeksillä. Alun perin homeindeksillä kuvattiin homeen määrän lisääntymistä männyn ja kuusen pintapuussa, mutta VTT:llä on puulla tehtyjen kokeiden jälkeen tarkasteltu myös muiden materiaalien homehtumista vastaavan homeindeksiluokituksen mukaisesti. VTT:n alun perin männyn ja kuusen pintapuulle kehittämää homeen kasvun laskentamallia on laajennettu vuosina 2005–2013 yhteistyössä TTY:n kanssa koskemaan myös muita rakennusmateriaaleja. Tätä laskentamallia kutsutaan parannetuksi homemalliksi. Parannettu homemalli soveltuu kaikkien rakennusmateriaalien homehtumisriskin tarkasteluun.

Parannetussa homemallissa käytetään edelleen homeindeksimäärittelyä. Homeen kasvua kuvataan homeindeksin  $M$  avulla, jonka arvo vaihtelee välillä 0-6. Homeindeksi määritetään kasvun alkamisen mukaan sekä sen pinnan peittävyys ja havaittavuuden mukaan, eli havaitaanko home paljaalla silmällä vai mikroskoopilla. Homeindeksi saadaan laskettua tietyistä tarkastelupisteistä tunneittain mitattujen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvojen avulla. Laskentamallin mukaan homeen kasvu alkaa homeindeksin ylittäessä arvon 1. Parannetun homemallin homeindeksien luokitustasot ja visuaaliset havaittavuudet on esitetty taulukossa 5.1. Indeksillä ei kuitenkaan pystytä ottamaan kantaa siihen, kuinka haitallisia materiaalissa kasvavat homeet ovat ihmisen terveydelle. (Vinha et al. 2013)

**Taulukko 5.1** Parannetun homemallin homeindeksin luokitustasot. (Vinha et al. Tutkimusraportti 143).

| Homeindeksi<br>$M$ | Havaittu homekasvu  | Huomautuksia  |
|--------------------|---|---|
| 0                  | Ei kasvua   | Pinta puhdas  |
| 1                  | Mikroskoopilla havaittava kasvu   | Paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma   |
| 2                  | Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu                                   | Homerihmasto peittää 10 % tutkittavasta alasta (mikroskoopilla),<br>Useita rihmastopesäkkeitä muodostunut       |
| 3                  | Silmin havaittava kasvu<br>Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu        | Alle 10 % peitto alasta (silmillä)<br>Alle 50 % peitto alasta (mikroskoopilla)<br>Uusia itiöitä alkaa muodostua |
| 4                  | Selvä silmin havaittava kasvu<br>Runsas mikroskoopilla havaittava kasvu | Yli 10 % peitto alasta (silmillä)<br>Yli 50 % peitto alasta (mikroskoopilla)                                    |
| 5                  | Runsas silmin havaittava kasvu  | Yli 50 % peitto alasta (silmillä)   |
| 6                  | Erittäin runsas kasvu   | Lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto   |

Materiaalien homehtumisominaisuuksia on mahdollista arvioida homeen kasvun alkamisen, homehtumisen maksimitason sekä homeen taantumisen avulla. Homeen kasvun alkamiseen (homeindeksi  $M = 1$ ) vaadittavaa aikaa viikkoina,  $t_m$ , puun pinnalla vakioilämpötilassa ja -kosteudessa kuvataan homemallissa regressiomallilla (Hukka & Viitanen 1999):

$$t_m = \exp(-0,68\ln T - 13,9\ln RH + 0,14W - 0,33SQ + 66,02), \quad (5.2)$$

|       |    |    |  |
|-------|----|----|--|
| missä | T  | on | lämpötila (°C)   |
|       | RH | on | suhteellinen kosteus (%)   |
|       | W  | on | puulaji (0 = mänty, 1 = kuusi)   |
|       | SQ | on | pinnan ravinteikkuus (0 = kuivauksen jälkeen uudelleen sahattu pinta, 1 = alkuperäinen, kuivaamosta tullut pinta). |

Rakenteen homehtumisaste voidaan määrittää homeen kasvulle suotuisissa olosuhteissa ajan suhteen seuraavalla differentiaaliyhtälöllä (Hukka & Viitanen 1999):

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \exp(-0,68\ln T - 13,9\ln RH + 0,14W - 0,33SQ + 66,02)} k_1 k_2 \quad (5.3)$$

Yhtälössä 5.3 aikayksikkönä on vuorokausi ja yhtälön avulla voidaan laskea keskimääräinen kerran vuorokaudessa esiintyvä homeindeksin arvo. Yhtälössä 5.3 käytetty kerroin  $k_1$  kuvaa pinnan homehtumisnopeutta, joka voidaan laskea homeen kasvun alkamiseen vaadittavan ajan avulla. Kaava 5.3, jolla homehtumisaste ajan suhteen voidaan laskea, ei ole kuitenkaan enää pätevä homeindeksin ylittäessä arvon 1. Homeindeksin arvon  $M = 3$  saavuttamiseen tarvittavalle ajalle,  $t_v$ , on käytössä oma kaavansa (Hukka & Viitanen 1999)

$$t_v = \exp(-0,74\ln T - 12,72\ln RH + 0,06W + 61,50) \quad (5.4)$$

Jos homeindeksin oletetaan kasvavan välillä  $M=1 \dots M=3$  tasaisesti vakioolosuhteissa, kaavat 5.2 ja 5.4 voidaan yhdistää. Kaavojen yhdistämisen avulla saadaan homehtumisnopeutta kuvaava kerroin  $k_1$ .

$$k_1 = \begin{cases} 1, & \text{kun } M < 1 \\ \frac{2}{\frac{t_v}{t_m} - 1}, & \text{kun } M > 1 \end{cases} \quad (5.5)$$

Kaavassa 5.3 käytetty kerroin  $k_2$  kuvaa homeindeksin kasvun hidastumista homeindeksin huippualueella  $4 < M < 6$ . Homeindeksin kasvun hidastuminen voidaan laskea kaavalla

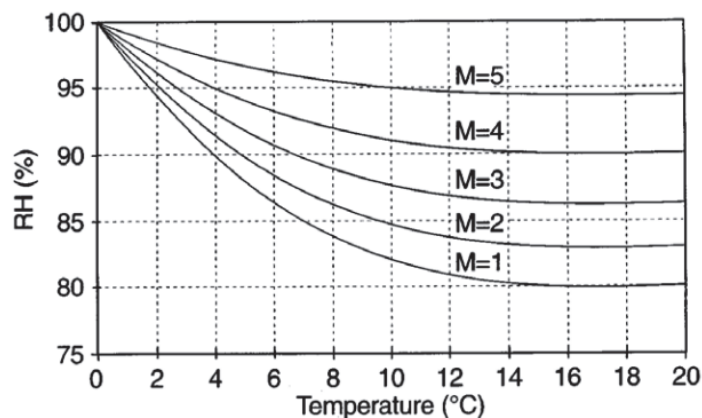
$$k_2 = \max[1 - \exp[2.3 \cdot (M - M_{max})], 0] \quad (5.6)$$

Kaavassa 5.6  $M_{max}$  kuvaa suurinta homeindeksiä materiaalin pinnalla ja  $M$  tarkoittaa tätä tilannetta edeltävää homeindeksin arvoa. Alkutilanteessa oletetaan usein, että homeindeksin arvo  $M = 0$ . Homeindeksin maksimiarvo on riippuvainen sekä materiaalista että olosuhteista ja se voidaan laskea seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$M_{max} = A + B \cdot \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} - C \cdot \left( \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right)^2 \quad (5.7)$$

Kertoimet A, B ja C muuttuvat rajapinnan materiaalien herkkyyden mukaan. Tässä tutkimuksessa seinärakenteen puurungolle käytetyt arvot ovat seuraavat: A = 1, B = 7 ja C = 2.

Kuvassa 5.2 on esitettyä erilaisia lämpötila- ja kosteusolosuhteita vastaavat homeindeksin maksimiarvot puumateriaalin pinnalla. (Vinha et al. 2013)



**Kuva 5.2** Homeen kasvulle suotuisat olosuhteet, joilla saavutetaan homeindeksien mukaiset maksimiarvot puun pinnalla. (Hukka & Viitanen 1999)

Kertoimien  $k_1$  ja  $k_2$  arvot on esitettyä eri homehtumisherkkyysluokissa taulukossa 5.2. Taulukossa 5.2 on esitetty myös kertoimien A, B ja C arvot eri homehtumisherkkyysluokissa.

**Taulukko 5.2** Homehtumisherkkyysluokkien kertoimet ja suhteellisen kosteuden minimiarvot. (Vinha et al. Tutkimusraportti 143)

|                          | $k_1$   |         | $k_2$ ( $M_{max}$ ) |   |     |            |
|--------------------------|---------|---------|---------------------|---|-----|------------|
| Homehtumisherkkyysluokka | $M < 1$ | $M > 1$ | A                   | B | C   | $Rh_{min}$ |
| Hyvin herkkä             | 1       | 2       | 1                   | 7 | 2   | 80         |
| Herkkä                   | 0,578   | 0,368   | 0,3                 | 6 | 1   | 80         |
| Kohtalaisen kestävä      | 0,072   | 0,097   | 0                   | 5 | 1,5 | 85         |
| Kestävä                  | 0,033   | 0,014   | 0                   | 3 | 1   | 85         |

Taulukossa 5.2 olevat  $RH_{min}$  arvot tarkoittavat suhteellisen kosteuden minimiarvoja, joita kuivemmissa olosuhteissa homehtumista tapahtuu hyvin vähän. Suhteellisen kosteuden minimiarvoja käytetään muun muassa kaavassa 5.1. Kuten taulukossa 5.2 on esitetty, materiaalit voidaan jakaa niiden homehtumisherkkyysluokien perusteella erilaisiin homehtumisherkkyysluokkiin. Homehtumisherkkyysluokkia on yhteensä 4.

Eri rakennusmateriaalien jakaantuminen homehtumisherkeyssluokkiin on esitettyinä taulukossa 5.3. (Vinha et al. 2013)

**Taulukko 5.3** Rakennusmateriaalien luokittelu parannetun homemallin homehtumisherkeyssluokkiin. (Vinha et al. 2013)

| Homehtumis-herkeyssluokka   | Rakennusmateriaali  |
|-----------------------------|---|
| Hyvin herkkä<br>HHL1        | Karkeasahattu ja mitallistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty   |
| Herkkä<br>HHL2              | Höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt, kipsilevy   |
| Kohtalaisen kestävä<br>HHL3 | Mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni <sup>1</sup> , kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiilet |
| Kestävä<br>HHL4             | Lasi ja metallit, alakalinen uusi betoni, tehokkaita homesuoja-aineita sisältävät materiaalit   |

<sup>1</sup> Kevytbetoni kuuluu homehtumisominaisuuksiltaan kahteen eri homehtumisherkeyssluokkaan. Homeen kasvunopeus on homehtumisherkeyssluokkaa HHL2, mutta homeindeksin maksimiarvo jää homehtumisherkeyssluokan HHL3 tasolle.

Tässä työssä homehtumisherkeyssluokista on käytössä kolme ensimmäistä. Kaikissa laskennassa tarkasteltavissa pisteissä, joissa tarkastelupiste on kosketuksissa jollain tavalla puuhun, käytetään homehtumisherkeyssluokkaa HHL1. Sen sijaan esimerkiksi pisteissä, joissa tarkastelupiste on mineraalivillan ja kipsilevyn rajapinnassa, käytetään homehtumisherkeyssluokkana luokkaa HHL2. Pelkästään mineraalivillaa sisältävissä kohdissa homehtumisherkeyssluokkana on tarkasteluissa HHL3.

Tavallisesti homeen kasvua esiintyy materiaalin pinnalla sekä kahden materiaalin rajapinnassa. Rajapinnan homeen kasvua tuleekin tarkastella herkemman materiaalin mukaan. Kuitenkin avohuokoisissa lämmöneristeissä, kuten mineraalivilloissa, homeen kasvua saattaa esiintyä myös materiaalin sisällä. Tällaisessa tapauksessa homeen kokonaismäärä voi olla huomattavasti suurempi kuin vain pinnaltaan homehtuvassa materiaalissa, joten tämä tulee ottaa huomioon rakenteen homehtumisriskin arvioinnissa. (Vinha et al. 2013) Yleensä mitä nopeammin homeen kasvu alkaa materiaalin pinnalla, sitä korkeammaksi homeindeksin on mahdollista nousta ja sitä nopeammin home myös taantuu, kun olosuhteet vaihtuvat sille epäedullisiksi. Homeen taantumista kuvataan erilaisilla taantumaluokilla sekä taantumakertoimella  $C_d$ . Homekasvun taantumaluokkia on neljä: voimakas taantuma HTL1, merkittävä taantuma HTL2, kohtalainen taantuma HTL3 sekä vähäinen taantuma HTL4. Alun perin homemallissa puun homehtumisen taantumaa vastasi voimakas taantuma, mutta myöhemmissä VTT:n ja TTY:n kokeissa on saatu selville, että taantuminen ei olisi puulla näin nopeaa. TTY:llä tehdyssä FRAME -projektissa on käytetty ainoastaan taantumaluokkia HTL2-HTL4, joita myös tässä tutkimuksessa käytetään. Homeen kasvun taantumaluokat löytyvät taulukosta 5.4. (Vinha et al. 2013)

**Taulukko 5.4** Rakennusmateriaalien homehtumisherkkyyssluokkaa tyypillisesti vastaava homekasvun taantumaluokka parannetussa homemallissa. (Vinha et al. 2013)

| Homehtumisherkkyyssluokka | Homekasvun taantumaluokka |
|---------------------------|---------------------------|
| Hyvin herkkä HHL1         | Merkittävä taantuma HTL2  |
| Herkkä HHL2               | Kohtalainen taantuma HTL3 |
| Kohtalaisen kestävä HHL3  | Vähäinen taantuma HTL4    |
| Kestävä HHL4              | Vähäinen taantuma HTL4    |

Homeen kasvun voidaan olettaa olevan erittäin hidasta niin sanotun kuivan kauden aikana, eli olosuhteissa, jotka ovat epäsuotuisat homeen kasvuille. Homeen visuaalinen esiintyminen ei välttämättä muutu kuivan kauden aikana, mutta homeen kasvussa voidaan selvästi havaita pieni viive. Viive esiintyy jo 6 h kuivan jakson jälkeen, mutta kuivan jakson pidentäminen 24 tuntiin ei vaikuta viiveeseen merkittävästi. 24 tunnin jälkeen viive pitkittyy jälleen. Kuivan kauden aiheuttama viive voidaan ottaa huomioon seuraavan kaavan avulla (Mäkitalo 2012)

$$\frac{dM}{dt} = C_d \cdot \begin{cases} -0,032 \cdot \left(\frac{t-t_1}{24}\right), & \text{kun } 0h < t \leq 6h \\ 0, & \text{kun } 6h \leq t \leq 24h \\ -0,016 \cdot \left(\frac{t-t_1}{24}\right), & \text{kun } t > 24h \end{cases}, \quad (5.8)$$

missä  $t$  on laskenta-aika alkuhetkestä  $t_l$  (h)  
 $t_l$  on alkuhetki (h)  
 $C_d$  on homeen taantumisnopeutta kuvaava materiaalikohtainen taantumakerroin.

Yhtälössä olevat vakiokertoimet on määritetty alun perin männyn pintapuulle. Yhtälöä voidaan käyttää myös muita rakennusmateriaaleja käytettäessä kertomalla vakio-kertoimet materiaalin mukaisella taantumaluokasta riippuvalla taantumakertoimella. Taantumakertoimien arvot eri taantumaluokissa on esitettyinä taulukossa 5.5. Voimakkaan taantumun taantumaluokka ja taantumakerroin on jätetty tässäkin taulukossa pois.

**Taulukko 5.5** Homeen kasvun laskentamallissa käytettävät taantumaluokkien nimet ja taantumakertoimet. (Vinha et al. 2013)

| Taantumaluokka       | Taantumakerroin<br>$C_d$ |
|----------------------|--------------------------|
| Merkittävä taantuma  | 0,50                     |
| Kohtalainen taantuma | 0,25                     |
| Vähäinen taantuma    | 0,10                     |
| Vähäinen taantuma    | 0,10                     |

## 6 RAKENTEIDEN TOIMINNAN TARKASTELUPERIAATTEET

Kappaleessa 6 kerrotaan lyhyesti rakennusfysikaalisten laskentatarkastelujen perusteet ja miten rakennusfysikaalisia tarkasteluja tehdään. Kappaleessa kerrotaan myös, mitä eri toimintakriteereitä tässä tutkimuksessa käytetään rakenteille sekä, mitä ohjeita ja säännöksiä on annettu rakenteiden toimivasta suunnittelusta. Kappaleessa 6 kerrotaan myös, mitä sisä- ja ulkoilman olosuhteita rakennusfysikaalisessa mallintamisessa käytetään.

### 6.1 Rakennusfysikaalisten laskentatarkastelujen perusteet

Rakennusten ja rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan liittyvät seikat luetaan rakennusfysiikan osa-alueiksi. Rakennusfysiikkaan voidaan lukea kuuluvaksi myös rakennusten akustiikka ja valaistus. Tässä tutkimuksessa keskitytään kuitenkin ainoastaan rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tarkasteluun. Rakennustekniikkaan kuuluu tärkeänä osana rakenteiden lujuustarkastelujen tekeminen. Lujuustarkasteluihin on ollut jo pitkään erilaisia mitoitusmenetelmiä, joilla voidaan määrittää rakenteiden kantavuus ja kestävyys myös ääriolosuhteissa, mutta rakennusfysikaalisiin tarkasteluihin tällaisia mitoitusmenetelmiä ei ole ollut. Rakenteiden lujuustarkastelujen tekemisen edellytyksenä on rakenteiden mekaniikan ja statiikan sekä erilaisten murtumismekanismien ja kuormitusten hyvä tuntemus. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa tulee hallita vastaavia asioita rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan osalta. Tyypillisesti laskentatarkasteluissa tutkitaan esimerkiksi kosteuden siirtymistä kerroksellisissa rakenteissa, tehdään kondensoitumis- ja homeutumistarkasteluja, lasketaan rakenteiden U-arvoja ja rakennuksen energiankulutusta sekä tehdään sisäilman olosuhteiden tarkasteluja. Laskentatarkasteluissa voidaan tutkia myös kosteuden kulkusuunnan muuttumista vuodenajasta riippuen, tarkastella sisä- ja ulkoilman olosuhteiden muutoksia, tehdä rakenteiden kostumis- ja kuivumistarkasteluja sekä ilmavirtausten tarkasteluja. (Vinha et al. 2013)

Jotta rakenteiden toimintaa voidaan arvioida luotettavasti, tulee tuntea lämpö- ja kosteustekniikan teoria, erilaiset rakenteiden toimintakriteerit ja vaurioitumismekanismit, rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet, rakenteita rasittavat tekijät sekä niiden yhdistelmät erilaisissa ääriolosuhteissa ja keskimääräisissä olosuhteissa. Se, että pystytään luomaan tarkkoja laskentamalleja rakenteista, edellyttää suurta tie-



tomäärää rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisista ominaisuuksista ja olosuhteista, joissa rakenteita tutkitaan. Laskentaan käytettävien ohjelmien täytyy osata huomioida keskeisimmät lämmön ja kosteuden siirtymismuodot ja niiden avulla pitää pystyä tarkastelemaan rakenteita eri olosuhteiden vaikutuksessa. Nykyään materiaalitietoja on hyvin saatavilla ja myös laskentaohjelmat ovat kehittyneempiä. Laskentaohjelmilla pystytään tarkastelemaan melko monimutkaisiakin rakenteita usean eri tekijän yhteisvaikutuksessa. Laskennallinen tarkastelu kannattaa tehdä vain rakenteen kriittisimmistä kohdista ja laskennassa käytettävän tarkasteluajan tulee olla riittävän pitkä alkukosteuksien tasoittumiseksi. (Vinha et al. 2013)

## 6.2 Rakenteiden toimintakriteerit

Rakennusfysikaalisen laskennan suunnittelu alkaa tarkasteltavan rakenteen valinnalla. Kun rakenne on valittu, valitaan rakenteelle toimintakriteerit sekä raja-arvot. Toimintakriteereiksi valitaan kriittisimmät ihmisille terveys- ja viihtyvyyshaittoja aiheuttavat tekijät ja sellaiset tekijät, jotka lisäävät rakenteiden vaurioitumisriskiä. TTY:llä kehitetyssä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmässä rakenteiden lämpö- ja kosteustekniset tarkastelut tehdään laskennallisesti mitoittavissa sisä- ja ulkoilman olosuhteissa ja rakenteiden asianmukaista kosteusteknistä toimintaa arvioidaan erilaisten toimintakriteerien avulla. TTY:n analysointimenetelmä koostuu kuudesta osa-alueesta, joita ovat toimintakriteerit, laskentaohjelmat, materiaaliominaisuudet, sisä- ja ulkoilman olosuhteet sekä tarkasteluperiaatteet. (Vinha et al. 2013)

Toimintakriteereiksi TTY:n analysointimenetelmässä on määritetty yleensä kosteuden kondensoituminen ja homeen kasvu. Tässä tutkimuksessa rakenteiden toimintakriteereiksi on valittu nämä samat tekijät. Monet toimintakriteerit ovat riippuvaisia ulkoilman olosuhteista ja ulkoilman olosuhdetekijät aiheuttavat kriittisiä olosuhteita rakenteille tai koko rakennukselle. Ulkoilman olosuhteiden kriittisyyteen saattavat vaikuttaa useat eri olosuhdetekijät, joten eri toimintakriteerit saattavat vaatia usean ulkoilman testivuoden määrittämistä, jotta löydetään kriittinen testivuosi juuri tietylle toimintakriteerille. Vaikka rakenteille on olemassa useita toimintakriteerejä, voidaan FRAME:n mukaan niiden määrää tietylle rakenteelle kuitenkin vähentää. Jos rakenne toimii hyväksyttävästi esimerkiksi homeen kasvun suhteen, ei rakenteessa ole myöskään liiallisen kosteuden aiheuttamaa puun lahoamisen vaaraa. (Vinha et al. 2013) Tässä työssä käytettävät toimintakriteerit on esitetty seuraavaksi.

### 6.2.1 Homeen kasvu

Harvoin toimintakriteereihin on käytössä laskentamalleja tai vertailusuureita, joilla voidaan luotettavasti arvioida sisä- ja ulkoilman olosuhteiden vaikutusta toimintakriteerin mukaiseen vaurioitumistapaan. Homeen kasvulle tällainen malli on käytettävissä ja siksi homeen kasvua käytetään tässä tutkimuksessa rakenteiden toimintakri-

teerinä. Homeen kasvua ja homeen kasvun laskentamallia on käsitelty kappaleessa 5 Materiaalien homehtuminen. Ulkoilmassa homeindeksin maksimiarvo nousee hyvin korkeaksi testivuosien aikana. Tämän vuoksi homeen kasvu lähellä vaipparakenteiden ulkopintaa joudutaan hyväksymään. Homeen kasvua ei kuitenkaan koskaan sallita rakenteiden sisäpinnoilla. Tässä tutkimuksessa homeen kasvua ei sallita kantavissa rakenteissa eikä lämmöneristekerroksissa. Myöskään lämmöneristekerroksen sisäpuolisissa osissa homeen kasvua ei sallita. Homeindeksin maksimiarvoksi on valittu siis lämmöneristeen sisä- ja ulko-osissa arvo  $M_{\max} < 1,0$ . Homeindeksin arvon pitämiseen alle 1 näissä rakenteen kohdissa on useita perusteita: (Vinha et al. 2013)

- Kantavien rakenteiden käyttöikätaavoite on yleensä vähintään 50 vuotta ja rakenteita on haastava vaihtaa.
- Vaikka homehtumisherkkyyden laskennassa käytetäänkin homeen kasvun kannalta kriittisiä ilmasto-olosuhteita, voivat olosuhteet homeen kasvulle olla joinakin vuosina vielä kriittisemmät.
- Jos hometta on lämmöneristekerroksessa tai sen sisäpuolella, on homeiden tai niiden aineenvaihduntatuotteiden merkittävästi helpompaa siirtyä sisäilmaan rakenteen mahdollisten vuotokohtien kautta.
- Avohuokoisella eristeellä eristettyyn rakenteeseen hometta voi kertyä suuria määriä, koska homeet voivat kasvaa eristeen sisällä.
- Valitun raja-arvon tulee olla riittävän alhainen myös siksi, että laskennallisissa tarkasteluissa on aina virheen mahdollisuuksia mm. laskentaohjelmien yksinkertaistuksien ja puutteiden, rakenteissa olevien poikkeamien ja materiaaliominaisuuksien vaihteluiden vuoksi.
- Parannettu homemalli ei myöskään ota kantaa homehtumisen aiheuttamiin terveysongelmiin, joten tällöin homeiden aiheuttamat terveysongelmat pystytään välttämään sillä, että homeen kasvua ei yksinkertaisesti sallita rakenteiden kriittisissä kohdissa.
- Homeen kasvulle on ominaista, että jo kerran homehtunut materiaali homehtuu uudestaan herkemmin, jos olosuhteet ovat homeen kasvulle ajoittain otolliset. Tätä on vaikeaa ottaa huomioon laskentatarkasteluissa, joten on helpompaa tässäkin tilanteessa asettaa homeindeksin raja-arvo niin alas, ettei homeen kasvua tapahdu.
- Rakenteisiin saattaa vaikuttaa myös huomattavasti suurempi kosteusrasitus kuin mitä laskentatulokset näyttävät, johtuen rakennuksen ympärillä vaikuttavasta mikroilmastosta, jota laskelmissa ei voida ottaa huomioon.

Seinien ulkoverhouksissa ja kylmissä vesikattorakenteissa saattaa esiintyä vähäisiä homekasvustoja varjoisissa osissa, vaikka rakenne olisikin kosteusteknisesti täysin toimiva. Homeen kasvu rakenteissa saattaa alkaa syksyllä korkean ilman suhteellisen kosteuden takia. Tällaiset homekasvustot voidaan kuitenkin rinnastaa luonnossa tapahtuvaan homeen kasvuun, eivätkä ne välttämättä aiheuta minkäänlaisia toimenpi-

teitä. (RIL 107-2000) Homeen kasvun mahdollisuutta laskettaessa on hyvä ottaa huomioon, että pelkkä homeen kasvu ei välttämättä johda rakenteiden vaurioitumiseen, vaan homehtumisen suurin riski on sen sisäilmaan aiheuttamat ongelmat.

## 6.2.2 Kosteuden kondensoituminen

Toinen tässä työssä rakenteille määritetty toimintakriteeri on kosteuden kondensoituminen, koska myös sitä voidaan arvioida laskennallisesti luotettavasti. Kosteuden kondensoituminen riippuu lämpötilasta, materiaaleista ja niiden välisestä kontaktista. Rakenteissa kondensoitumista saattaa tapahtua tilanteessa, jossa kostea ilma joutuu kosketuksiin sellaisen pinnan tai huokosseinämän kanssa, jonka lämpötila on alhaisempi kuin ilman kastepistelämpötila. Vesihöyry vaatii tiivistyäkseen korkean ilman suhteellisen kosteuden eli tilanteen, jossa vesihöyryn kastepiste ylittyy. Normaalisti tiivistyminen tapahtuu rakenteen sisällä tai rakenteen pinnassa, kun ilman vesihöyrypitoisuus on saavuttanut tietyssä kohdassa kyllästyskosteuspitoisuuden, joka vastaa ilman suhteellisen kosteuden arvoa 100 %. Rakenteen sisällä kosteus tiivistyy usein materiaalikerrosten välisiin rajapintoihin. (Siikanen 2014)

Yleensä kosteuden kondensoitumista pääsee tapahtumaan esimerkiksi rakenteissa, joissa liian kylmä rakenteen sisäpinta rajoittuu lämpimään huonetilaan (esimerkiksi ikkuna). Kosteuden kondensoitumista saattaa tapahtua myös, jos rakenteissa höyryn-sulku on väärin asennettu tai väärin sijoitettu tai rakenteen höyrynsulussa on reikiä, joiden vuoksi rakenteessa pääsee tapahtumaan konvektiota sisältä ulospäin. Myös rakenteissa olevat kylmäsillat aiheuttavat kondensoitumista. (Siikanen 2014) Kosteuden kondensoituminen rakenteissa saattaa aiheuttaa rakenteissa muodonmuutoksia ja rakennusfysikaalisten ominaisuuksien heikkenemistä. Kosteuden kondensoitumisen takia puupohjaisten materiaalien lujuus ja jäykkyys heikentyvät, lämmöneristeen lämmönjohtavuus kasvaa, lämmöneristeiden ja tuulensuojalevyjen muodonmuutokset lisääntyvät ja naulat voivat höltyä puurakenteissa. (Vinha 2007)

Jotta voidaan välttää kosteuden tiivistyminen rakenteissa, tulee rakenteen pintalämpötilan olla korkeampi kuin ympäröivän ilman kastepistelämpötila. Ratkaisevia tekijöitä kosteuden kondensoitumiselle rakenteiden sisäpinnoille ovat rakenteen lämmönvastus, sisäpinnan lämmönvastus, sisäilman kosteuslisä sekä ulkoilman lämpötila. Rakenteita suunniteltaessa ulkoilman lämpötilaan ei voida vaikuttaa, mutta kolmeen ensimmäiseen tekijään voidaan. (Björkholtz 1997) Rakenteet tulee suunnitella niin, että kosteuspitoisuus ei pääse vuosien mittaan kasvamaan rakenteiden sisällä haitallisen korkeaksi. Kosteuspitoisuudet kuitenkin vaihtelevat rakenteissa jatkuvasti ympäröivien olosuhteiden muutoksista johtuen. Sisältä tulevan kosteuden tiivistyminen vedeksi rakenteen jossakin kohdassa voidaan estää sillä, että rakenteen lämpimälle puolelle asennetaan riittävän diffuusiotiivis kerros ja siten, että rakenteen vesihöyrynvastus pienenee sisältä ulospäin siirryttäessä. Riittävän vesihöyrytiivis ker-

ros rakenteen lämpimällä puolella estää samalla ilmavuodot rakenteen läpi sekä mahdolliset konvektion aiheuttamat kondenssivauriot rakenteissa. (Siikanen 2014)

Laskentatarkasteluissa käytettävän yksiselitteisen tasapainokosteuskäyrän vuoksi rakenteiden rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa yleisesti käytössä olevat laskentaohjelmat eivät osaa laskea kosteuden kondensoitumista täysin oikealla tavalla eikä suhteellisen kosteuden ylärajana laskentatuloksia arvioitaessa voida pitää 100 % RH. Näissä laskentaohjelmissa vesi ei ole vapaana vaan se on aina sitoutuneena joko eri materiaaleihin tai ilmaan. Tällöin kosteuden kondensoituminen tietyssä materiaalien rajapinnassa havaitaan siten, että materiaalikerrosten kosteuspitoisuus nousee rajapinnan lähellä yli hygroskooppisen alueen. Hygroskooppisen alueen suhteellisen kosteuden ylärajaksi on määritetty 98 % RH suhteellinen kosteus, sillä käytännössä 98 % RH on yläraja, joka on mahdollista saavuttaa säilyttämällä koekappaletta kosteuskammiossa (Vinha 2011).

Tilannetta, jossa kosteuden kondensoitumista arvioidaan kosteuspitoisuuden nousemisella yli hygroskooppisen alueen, voidaan verrata todelliseen tilanteeseen silloin, kun lämpötila on yli 0 °C ja rakenteiden rajapinnassa olevat materiaalit ovat kapillaarisia ja tiiviissä kosketuksessa toisiinsa. Laskentaohjelmissa kuitenkin kapillaarinen kosteuden siirto toimii kapillaarisilla materiaaleilla kaikissa lämpötiloissa eikä rakenteessa tapahdu jäätymistä. Oikeassa rakenteessa kosteutta voi tiivistyä kuitenkin materiaalikerrosten välisiin rajapintoihin vedeksi tai jääksi lämpötilasta, materiaalien kontaktista ja ominaisuuksista riippuen. Materiaalien pintaan tiivistyvä kosteus voi taas valua painovoimaisesti rakenteen alaosiin ja aiheuttaa kosteusvaurioita rakenteisiin. Nykyisissä laskentaohjelmissa tätä ei pystytä ottamaan huomioon, koska niissä kosteutta ei kerry materiaalien rajapintoihin eikä kosteus siirry ohjelmissa tyypillisesti painovoimaisesti. Näiden asioiden vuoksi kosteuden kondensoitumista rakenteissa ja materiaalien rajapinnoissa tulee rajoittaa. (Vinha et al. 2013) Tässä tutkimuksessa 97 % suhteellista kosteutta pidetään materiaalien hygroskooppisen alueen suhteellisen kosteuden ylärajana, jolloin saadaan varmalla puolella oleva tulos siitä, että kosteutta ei pääse tiivistymään liiallisessa määrin rakenteisiin. Kosteuden kondensoitumista rakenteissa ei sallittu ollenkaan ja raja-arvona kondenssitarkasteluissa käytettiin 97 % RH suhteellista kosteutta.

### **6.3 Ohjeet ja määräykset rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä toiminnasta**

Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä toiminnasta annetaan määräyksiä ja ohjeita muun muassa Rakentamismääräyskokoelman osassa C2 (1998) Kosteus sekä RIL:in ohjeessa RIL107–2012 (2012) Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Rakentamismääräyskokoelman osassa C2 (1998) sanotaan esimerkiksi seuraavaa: ”Rakennus on suunniteltava siten, ettei siitä aiheudu rakennuksen käyttäjälle tai naapu-

reille hygienia- tai terveysriskiä kosteuden kertymisestä rakennuksen osiin tai sisäpinnoille. Rakennuksen näiden ominaisuuksien tulee normaalilla kunnossapidolla säilyä koko taloudellisesti kohtuullisen käyttöiän ajan.” Myös Rakentamismääräyskokoelman osassa D2 (2003) todetaan, että rakennus pitää suunnitella ja rakentaa siten, että sisäilmassa ei ole liikaa sellaisia kaasuja, hiukkasia tai mikrobeja, jotka aiheuttaisivat terveydelle haittaa. Rakennuksen sisäilmassa ei saa olla myöskään hajuja, jotka alentaisivat rakennuksen viihtyisyyttä. Jotta yllä mainitut vaatimukset täyttyisivät, tulee rakennusta suunniteltaessa ja rakennettaessa rakenteiden lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet tuntea hyvin ja rakenteet mitoittaa lämpö- ja kosteusteknisesti oikein.

Rakentamismääräyskokoelman osan C2 (1998) mukaan ulkoseinien rakenteiden tulee olla vesihöyrynvastukseltaan ja ilmatiiviydeltään sellaisia, että seinän kosteuspiitoisuus ei pääse sisäilman vesihöyryn diffuusion ja konvektion takia muodostumaan haitallisen suureksi. Asian varmistamiseksi seinän rakenteisiin asennetaan sopiviin kohtiin höyrynsulkuna, ilmansulkuna ja tuulensuojana toimivat rakennekerrokset. Rakentamismääräyskokoelman osassa C2 (1998) todetaan myös, että: ”Avohuokoisien lämmöneristyksen lämpimällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrynvastuksen tulee olla vähintään viisinkertainen verrattuna kylmällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrynvastukseen.” Jos näin ei ole, tulee rakenteeseen lisätä erillinen höyrynsulku tai rakenteen kosteustekninen toimivuus tulee osoittaa kokemukseen perustuen tai erillisillä tutkimuksilla. Myös RIL 107–2012 (2012) mukaan rakenteiden tulee olla sellaisia, että niihin ei pääse kertymään haitallisesti kosteutta ja jos näin kuitenkin käy, kosteuden pitää päästä kuivumaan rakenteesta mahdollisimman hyvin. RIL 107–2012 (2012) mukaan rakenteissa tulee aina olla höyry- ja/tai ilmansulku, jotta saavutetaan kosteusteknisesti luotettava rakenne. Rakennuksessa tulee myös olla mahdollista ylläpitää käyttötarkoituksen mukaista sisäilmastoa.

Tärkeä tekijä rakenteen kuivumisen kannalta on tuulensuojan vesihöyrynvastus. Tuulensuojalevy, jolla on pieni vesihöyrynvastus, parantaa rakenteen kuivumiskykyä. Toisaalta tällainen tuulensuojalevy saattaa taas syys- ja talvijaksolla aiheuttaa kosteuden kerääntymistä rakenteeseen, jos tuulensuojan lämmönvastus ei ole kuitenkaan riittävän suuri. (Mäkitalo 2012) Suurella tuulensuojan vesihöyrynvastuksella voidaan taas estää tehokkaasti ulkoilman aiheuttamaa rakenteen kostumista, mutta toisaalta samalla hidastetaan rakenteen kuivumista. Tuulensuojan lämmönvastuksen tulisi olla vähintään  $0,4 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ , jotta rakenne on toimiva myös tulevaisuudessa. Hyvän tuulensuojan lämmönvastuksen lisäksi myös seinärakenteen sisäpinnan tulee olla riittävän diffuusiotiivis. Riittävällä vesihöyrynvastuksella voidaan estää kosteuden siirtyminen rakenteen ulko-osiin ja näin voidaan estää mahdollinen kosteuden kondensoituminen ja homeen kasvu rakenteessa. Riippuen siitä, mikä tuulensuoja rakenteeseen valitaan, sisäpinnan ja tuulensuojan vesihöyrynvastuksien suhteen tulee vaihdella välillä 1-40:1. (Vinha et al. 2013) FRAME-projektin (2013) yhteydessä Suomen ra-

kentamismääräyskokoelmassa määrätty vastussuhde, 5:1 (RakMK C2 1998), on todettu riittämättömäksi vuoden 2100 ilmastossa rakenteissa, joissa tuulensuojan lämmönvastus on alle 0,8 (m<sup>2</sup>K)/W. FRAME -projektin loppuraportissa (2013) on esitetty vaadittavat sisä- ja ulkopinnan väliset vesihöyrynvastukset ja sisäpinnalta vaaditut vesihöyrynvastuksien minimiarvot vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa.

Rakennuksia ja rakenteiden teknisiä ratkaisuja suunniteltaessa tulee ottaa huomioon kolme kosteusteknisesti erilaista toimintajaksoa rakennuksen elinkaaren aikana. Jaksot ovat seuraavat:

- Rakentamisvaihe, jolloin ulkoinen ja materiaaleista vapautuva kosteusrasitus on suurimmillaan.
- Rakennuksen kuivumisvaihe, jolloin rakenteisiin kohdistuva rasitus voi olla merkittävästi suurempi kuin käytönaikainen rasitus.
- Rakennuksen käyttövaihe, jolloin rakenteissa ollut rakentamisaikainen kosteus on poistunut ja rakennuksen kosteustekninen toiminta seuraa ulko- ja sisäilman olosuhteita. (RIL 107 - 2000)

Jotta yllä olevat kosteusteknisesti erilaiset jaksot saadaan hallittua, tulee rakenteet suunnitella ja toteuttaa siten, että ne suojaavat sisätiloja ulkopuolisien kosteusrasitusten haitallisilta vaikutuksilta sekä mahdollistavat hyvän sisäilmaston ylläpitämisen. Ulkoseinärakenteen läpi ei saa tapahtua haitallista kosteuden siirtymistä eikä rakenteeseen saa kertyä haitallisessa määrin kosteutta. (RIL 107–2000) RIL:in ohjeessa RIL 107–2012 (2012) on esitetty yksityiskohtaisia ohjeita ulkoseinien yleisistä suunnittelu- ja toteutusperiaatteista. RIL:in ohjeessa on myös lisää ohjeita rakenteiden oikean lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan saavuttamiseksi. Tässä kappaleessa on käsitelty vain muutamia tämän tutkimuksen kannalta keskeisiä asioita.

## 6.4 Sisä- ja ulkoilman olosuhteet

Jotta rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa pystytään laskennallisesti mallintamaan, tarvitaan mallintamista varten sekä ulko- että sisäilman olosuhteet, joissa materiaalien rakennusfysikaalisen toiminnan laskenta suoritetaan. Ulkoilman ja sisäilman olosuhteiksi tulee valita rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittiset olosuhteet, joita voidaan kuvata niin sanottujen testivuosien avulla. Kriittisten testivuosien käyttäminen on tärkeää, koska rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa ei käytetä ulkoilman olosuhteiden osalta minkäänlaisia varmuuskertoimia. Tampereen teknillisessä yliopistossa FRAME-tutkimusprojektin yhteydessä on määritetty rakennusfysikaalisiin tutkimuksiin soveltuvat ulkoilman olosuhteita kuvaavat testivuodet, joita voidaan käyttää erilaisten rakenteiden laskennallisten tarkastelujen tekemiseen. Tässä tutkimuksessa käytetään edellä mainitun tutkimuksen yhteydessä

määritettyjä Suomen nykyisen ja tulevaisuuden ilmaston testivuosia. (Vinha et al. 2013)

Aiemmin rakennusfysikaalisissa tutkimuksissa on käytetty testivuosina esimerkiksi rakennusten energiankulutuksen laskentaan käytettäviä testivuosia. Nämä aiemmin käytettyjen testivuosien olosuhteet eivät ole kuitenkaan kuvanneet rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta kaikkein kriittisimpiä ulkoilman olosuhteita. FRAME-projektissa on määritetty testivuodet, joissa ulkoilman olosuhteet ovat kriittiset vaipparakenteiden kosteustekniselle toiminnalle. Testivuosien valinnassa on käytetty periaatetta, jonka mukaan vähintään noin 90 % vuosista tulee olla vähemmän kriittisiä tarkasteltavien toimintakriteerien suhteen kuin testivuosien. Testivuosien määrittämiseen on käytetty neljältä eri paikkakunnalta kerättyjä säätietoja. Paikkakunniksi testivuosien määrittämiseen on valittu Vantaa, Jokioinen, Jyväskylä sekä Sodankylä. Kyseiset paikkakunnat sijaitsevat eri puolilla Suomea ja ilmasto-olot ovat erilaiset kyseisillä paikkakunnilla. Tämän lisäksi näiltä paikkakunnilta on saatavilla kattavin ilmastodata. Kaikilta neljältä paikkakunnalta oli käytössä 30 vuoden ilmastodata, jonka tarkastelujaksoksi oli valittu vuosien 1980–2009 välinen ajanjakso. Testivuosien valinnassa on otettu huomioon ulkoilman olosuhteista lämpötila, suhteellinen kosteus, auringon kokonaissäteily (suora ja diffuusi säteily), sademäärä vaakapinnalle sekä tuulen nopeus ja suunta. Testivuodet on määritetty nykyilmastossa (1980–2009), vuoden 2050 ilmastossa (2040–2069) sekä vuoden 2100 ilmastossa (2070–2099). Ennustetun ilmastonmuutoksen mukaan ulkolämpötilat nousevat tulevaisuudessa, sademäärät kasvavat ja pilvisuus lisääntyy. Myös ulkoilman suhteellinen kosteus nousee mahdollisesti ja tuulisuus saattaa lisääntyä. Näin ollen rakenteiden kuivuminen hidastuu ja kuivumisajat pitenevät. (Vinha et al. 2013)

Testivuosissa käytetty nykyilmaston ilmastodata on modifioitu tulevaisuuden ilmastodataa varten Ilmatieteen laitoksen toimesta siten, että ilmastodatan olosuhteet vastaavat ennustettua olosuhteiden muutosta kriittisen A2-kasviuonekaasuskenaarion mukaisesti. A2-kasviuonekaasuskenaario on yksi kolmesta ennustetusta tulevaisuuden kasviuonekaasuskenaariosta, joissa lämpötila ja sademäärä muuttuvat riippuen kasviuonekaasupäästöjen määrän laskusta tai noususta. Eri kasviuonekaasuskenaarioista löytyy tarkemmin tietoa lähteestä Jylhä et al. (2009). Ensimmäinen skenaario B1 kuvaa optimaalista tilannetta, jossa kasviuonekaasujen päästöjä on saatu rajoitettua vuosisadan loppuun mennessä. Skenaariossa A1B päästöjen vähennykset ovat toteutuneet suunniteltua hitaammin ja tapauksessa A2 päästöjen määrää ei ole saatu rajoitettua, vaan ne ovat lisääntyneet entisestään, joten A2-skenaario on näistä kolmesta kriittisin. (Jylhä et al. 2009) Siitä, miten tulevaisuuden ilmastodataa on muokattu, löytyy tarkemmin tietoa julkaisuissa Jylhä et al. (2011a) ja Ruosteenoja et al. (2013).

## 7 LASKENTATARKASTELUJEN SUORITTAMINEN

Kappaleessa 7 on käsitelty tässä työssä tehtyjen laskentatarkastelujen suorittaminen ja laskentamallien tekeminen. Tässä kappaleessa on esitetty myös laskennassa käytetyt olosuhteet, raja-arvot sekä rakenteiden tarkastelupisteet.

### 7.1 Tutkimusmenetelmä

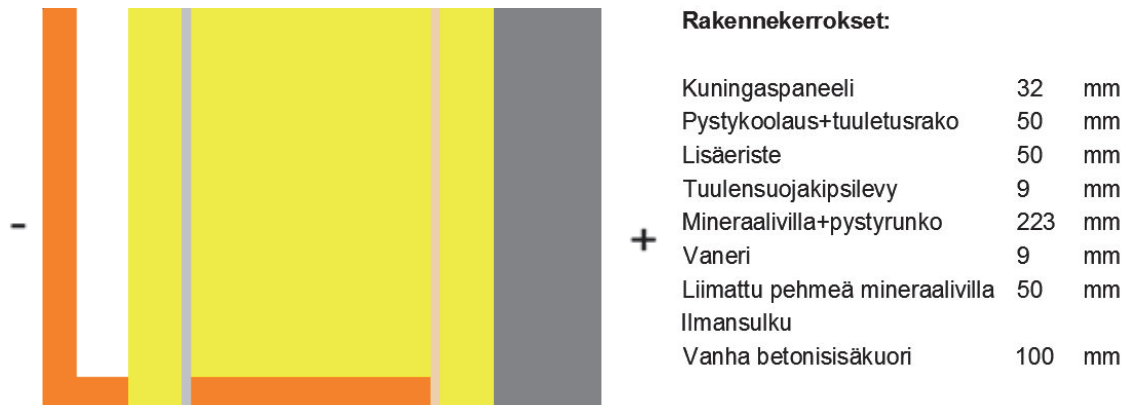
Laskentatarkastelujen tekemiseen on olemassa useita laskentaohjelmia. Laskentaohjelmat jaotellaan pääpiirteittäin stationäärisiin, epästationäärisiin sekä virtauslaskentaohjelmiin. Tässä tutkimuksessa rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tarkastelu suoritettiin saksalaisella epästationääriseen laskentaan tarkoitetulla, numeerisella Delphin 5.8.1-laskentaohjelmalla (Nicolai & Grünewald 2006). Epästationäärinen tarkoittaa tässä yhteydessä sitä, että laskenta voidaan suorittaa ajan suhteen muuttuvissa olosuhteissa.

Delphin 5.8.1 on yksi- tai kaksiulotteiseen laskentatarkasteluun tarkoitettu laskentaohjelma, jolla voidaan tutkia muun muassa diffuusiota ja kapillaarisuutta rakenteissa sekä viistosateen vaikutusta rakenteisiin. Näiden lisäksi Delphinillä voidaan tutkia rakennekerroksen läpi konvektiolla siirtyvää kosteutta sekä muita kosteudensiirtymismuotoja (pois lukien painovoimainen kosteudensiirtyminen), jotka vaikuttavat rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Laskennassa Delphin käyttää elementtimenetelmää. Delphin soveltuu myös rakenteessa olevien tuuletusvälien vaikutusten tarkasteluun. (Nicolai & Grünewald 2006) Ohjelmassa on valmiina kattava materiaalikirjasto, josta löytyy yleisimpiä rakennusmateriaaleja. Ohjelmaan pystyy myös luomaan omia materiaaleja tekstitiedostona ja tuomaan jo valmiiksi tehtyjä rakennusmateriaaleja omista tiedostoista.

Delphin 5.8.1 -ohjelmalla tehtävä laskenta aloitettiin rakennemallin luomisella. Rakennemallin mittojen asettamisen jälkeen malliin sijoitettiin materiaalit oikeille paikoilleen. Seuraavassa kuvassa (Kuva 7.1) on esitetty esimerkki laskentaohjelmaan toteutetusta ulkoseinärakenteesta (US1.1). Kuvassa rakenteen ulkopinta on vasemmalla ja sisäpinta oikealla puolella. Rakennemalli luotiin sillä periaatteella, että rakenteesta ei mallinneta mitään laskennan kannalta epäolennaisia osia ja mallintamisessa hyödynnettiin seinärakenteen symmetriapistettä. Tämä tarkoittaa sitä, että ra-



kennemallin alareuna kuvassa 7.1 on seinän runkotolpan puolella välissä ja rakennemallin yläreuna on ulkoseinärakenteen k-jaon keskellä.



**Kuva 7.1** Delphin 5.8.1 -ohjelmalla tehty, ylhäältäpäin kuvattu rakennemalli ulkoseinärakenteesta US 1.2 esitettynä ilman elementtiverkkoa. Rakenne on muodostettu symmetrialinjojen välisestä seinän osuudesta.

Mallinnetun rakenteen kokonaisleveys oli 300 mm, kun seinärakenteen runkotolppien k-jakona käytettiin 600 mm jakoa. Laskentamalleja yksinkertaistettiin jättämällä rakenteissa mahdollisesti olevat vaakakoolaukset pois, jotta mallia oli kevyempi käsitellä Delphin-ohjelmalla. Kaikki mallit luotiin samalla peruseriaatteella ja mitat olivat malleissa y-suunnassa samat (24 mm + 276 mm). Ohjelma mallinsi automaattisesti rakenteen 1000 mm syvyisenä. Kaikki työssä käytetyt seinärakennemallit mallinnettiin ylhäältäpäin kuvattuna. Tällöin saatiin otettua laskelmissa helpommin huomioon runkotolpan vieressä tapahtuva mahdollinen homeen kasvu, ohjelmalla, jolla ei ole mahdollista mallintaa rakennetta kolmiulotteisena.

Rakenteen mittojen määrittämisen jälkeen rakenteeseen luotiin elementtiverkko. Delphin -ohjelmassa lämpö- ja kosteusolosuhteet muuttuvat ainoastaan elementtien rajoilla, joten elementtien koko täytyy pitää riittävän pienenä, etenkin rakenteen tarkastelupisteissä. Laskentatarkkuuden varmistamiseksi elementtien koko on tiheämpi tarkastelupisteiden alueella materiaalien rajapinnoissa. Laskentatarkasteluissa materiaalien rajapinnoissa noin 1 mm kokoiset elementit ovat sopivan kokoisia riittävän tarkkuuden saavuttamiseen. Ohjelma tekee elementtiverkon automaattisesti tiheämmäksi rakennekerrosten rajapinnoissa ja nurkissa kuin tietyn rakennemateriaalin keskellä. Elementtiverkko on mahdollista luoda Delphin-ohjelmassa täysin automaattisesti, mutta elementtijakoa on mahdollista muuttaa myös manuaalisesti kohdissa, joista ei ole tärkeää saada erityisen tarkkaa informaatiota.

Elementtiverkon luonnin jälkeen rakenteeseen määritettiin alkuolosuhteet, jonka jälkeen asetettiin rajapintaolosuhteet ja rakenteen sisäpuolella ja ulkopuolella vallitsevat ilmasto-olosuhteet. Tässä vaiheessa rakennemalliin asetettiin myös tuuletusraon ilmanvaihto sekä muut mahdolliset rakenteessa vaikuttavat olosuhteet. Rakennemallin luonnin jälkeen valittiin laskennasta tulostettavat tiedot. Tässä työssä tulostiedos-

toiksi valittiin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvot valituissa tarkastelupisteissä. Laskentatarkastelujen kestonä käytettiin kahden vuoden ajanjaksoa ja laskenta aloitettiin aina tammikuun alusta. Laskentatulosten analysointi tehtiin laskennan toisen vuoden tuloksista kerätyn tiedon perusteella. Ohjelman tuottamista tiedoista kerättiin rakenteissa vallitsevat kosteus- ja lämpöolosuhteet valituissa tarkastelupisteissä. Kaikki laskennat tehtiin muuttuvissa lämpö- ja kosteusolosuhteissa.

## 7.2 Materiaaliominaisuudet

Laskennassa käytetyt materiaalit valittiin joko Delphinin omasta materiaalikirjastosta tai TTY:llä tehdyn FRAME -projektin (2013) yhteydessä luoduista materiaalitiedoista. Delphinin materiaalikirjaston materiaaliominaisuudet on määritetty pääasiassa Dresdenin teknillisessä yliopistossa (TUD) Saksassa. Delphinin omien materiaalien joukossa on myös kirjallisuuden arvojen perusteella luotuja materiaaleja.

Osa materiaaleista luotiin myös itse, muokkaamalla materiaalikirjastossa olevien materiaalien esiasetuksia tarkoitukseen sopiviksi. Osa rakennemallien materiaaleista luotiin tekemällä rakennekerroksen rajapintaan sopivan suuruinen näennäinen vesihöyrynvastus tai veden tai ilman liikkumista estävä kalvo. Tällä tavoin tehtiin laskennassa käytetyt tuulensuojavillan tuulensuojakalvot sekä osa ilman- ja höyrynsulkukalvoista. Laskennassa käytettyjen materiaalien rakennusfysikaalisia ominaisuuksia löytyy liitteestä 1. Näennäisvastusten arvot vastaavat kirjallisuudessa olevien vastaavien materiaalien oikeita vesihöyryn-, ilman- ja kosteudenläpäisevyyksien arvoja.

Betonisisäkuorisilla rakenteilla rakenteiden ulko- ja sisäpintaan ei mallinnettu maalia eikä muita pinnoitteita. Tiilisisäkuorella toteutettuihin rakenteisiin mallinnettiin maalipinta, joka paransi rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastusta.

## 7.3 Olosuhteet

Tässä tutkimuksessa käytettiin ulkoilman olosuhteina FRAME-projektissa (2013) määritettyjä Jokioisen ja Vantaan säätiedostoja nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa. FRAME-projektin mukaan tarkasteltaessa sellaisia rakenteita, joissa viistosade vaikuttaa rakenteen sisäosan kosteustekniseen toimintaan, voidaan käyttää Vantaa 2007 -säätiedostoa nykyilmaston laskelmissa. Tätä ilmastodataa käytettiin tässä tutkimuksessa tiiliverhotuilla seinärakenteilla. Tulevaisuuden ilmastossa tiiliverhottujen seinien laskelmat tehtiin käyttäen Vantaa 2050 -säätiedostoa. FRAME-projektissa (2013) todetaan myös, että rakenteilla, joiden sisäosa on suojattu sateen vaikutuksilta, voidaan ilmastodataksi valita nykyilmastossa Jokioinen 2004 ja vastaavasti tulevaisuuden ilmastoksi Jokioinen 2050. Näitä kahta ilmastodataa käytettiin tässä tutkimuksessa kaikilla puuverhotuilla seinillä.

Edellä mainitut ulkoilman testivuodet osoittautuivat FRAME-projektissa kriittisiksi, kun rakenteiden toimintakriteereinä pidettiin homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista rakenteen sisällä. Ilmansuuntana laskelmissa käytettiin Jokioisen testivuosilla laskettaessa pohjoista ja Vantaan testivuosilla etelää. Pohjoinen on kriittisin Jokioisen testivuosissa, koska siinä ilmansuunnassa auringonsäteilyn lämmittävä ja kuivattava vaikutus on vähäisin. Vantaan testivuosilla taas viistosade on voimakkain ta eteläisellä seinällä. Eteläseinällä myös auringonsäteily lisää diffuusion vaikutuksella siirtyvän kosteuden määrää ulkoilman rakenteen sisäosiin, koska ilmaraon lämpötila kasvaa auringonsäteilyn vaikutuksesta ja tuuletusvälin ilmavirtaus lisääntyy. Tässä työssä käytetyt säätiedostot sisälsivät ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden tiedot, sade- ja tuulitiedot sekä auringon säteilytiedot tuntiarvoina.

Rakenteen alkuolosuhteina tässä työssä käytettiin koko rakenteessa lämpötilaa  $+ 5\text{ °C}$  ja suhteellista kosteutta 80 % RH. Rakenteiden alkukosteus 80 % RH vastaa karkeasti työmaaolosuhteissa sateelta suojattuina olevien materiaalien kosteutta. Alkuolosuhteet pidettiin samana kaikissa rakennemalleissa kaikissa rakenteen osissa. Tarkasteltavien rakenteiden sisäilman lämpötila pidettiin laskennassa koko ajan vakiona. Sisäilman lämpötilana laskennassa käytetään RIL 107–2012 (2012) mukaista tasaista  $21\text{ °C}$ :n lämpötilaa ympäri vuoden. Tällä lämpötilalla otettiin huomioon myös sisätilan jäähtymisen vaikutus kesäaikana.  $21\text{ °C}$  lämpötila täyttää Suomen sisäilmastoluokituksen lämpötilan talven tavoitearvon laatuluokassa S3 (Sisäilmastoluokitus 2008). Aiemmissa tutkimuksissa on todettu, että matala sisälämpötila on rakenteille kriittisempi kuin normaali huonelämpötila. Vakiolämpötila  $21\text{ °C}$  edustaa aikaisemmista kenttämittauksista mitattua 90 % kriittisyystasoa. (Vinha 2007).

Kosteustarkasteluissa käytettiin myös kesällä  $21\text{ °C}$  sisälämpötilaa, koska se on kriittisempi rakenteille kuin sisäilmastoluokituksen mukainen kesäajan tavoitelämpötila  $25\text{ °C}$ . Laskennassa käytetty lämpötila oli jonkin verran varmalla puolella, mutta silti järkevä arvo, koska lämpötila saattaa olla tätäkin alhaisempi etenkin sellaisissa rakennuksissa, joissa asukkaat oleskelevat harvoin. (Mäkitalo 2012)

Sisäilman kosteuslisänä pidettiin kosteusluokan 2 mukaisia kosteuslisän arvoja, jotka ovat talvikaudella  $5\text{ g/m}^3$ , kun ulkoilman lämpötila oli alle  $5\text{ °C}$  ja kesäkaudella  $2\text{ g/m}^3$ , kun lämpötila oli yli  $15\text{ °C}$ . Tällä välillä sisäilman kosteuslisä muuttui lineaarisesti. Sisäilman kosteuslisä otettiin laskennassa huomioon ulkoilman lämpötilasta riippuvalla kosteuslisän mitoitusarvolla. Nämä kosteuslisän mitoitusarvot on määritetty RIL 107:ssä (2012) eri kosteusluokissa ulkolämpötilan funktiona.

Tutkimuksessa siis otetaan huomioon normaalista rakennuksen käytöstä ja asumisesta aiheutuvan kosteuslisän vaikutukset rakenteiden toimintaan. Laskennassa rakenteen sisä- ja ulkopintaan vaikuttivat vesihöyryn diffuusio sekä lämmönjohtuminen. Rakenteen ulkopintaan vaikuttivat laskentaohjelmassa lisäksi sade, suora ja diffuusi

auringon säteily sekä pitkäaaltoinen säteily. Kaikki rajapintaolosuhteet asetettiin rakenteisiin tiedostoina, joita oli käytetty myös FRAME -projektin laskentatarkasteleissa. Jotta kaikki rajapintaolosuhteet saatiin ohjelmaan mallinnettua, tarvittiin lämpötilatiedot, suhteellisen kosteuden tiedot, sadetiedot, suoran ja diffuusin auringonsäteilyn tiedot sekä taivaan lämpötilan tiedot halutulta ajanjaksolta ja paikkakunnalta.

## 7.4 Raja-arvot

Laskennasta saatujen rakenteen lämpö- ja kosteustietojen avulla tehtiin homeindeksin laskennallinen arviointi rakenteen kriittisistä pisteistä. Homeen kasvun arviointi tehtiin parannetun homemallin pohjalta luodulla Excel-pohjaisella laskurilla. Home-riskilaskurilla voidaan arvioida yhden materiaalin tai kahden materiaalin rajapinnan homehtumisriskiä, kun tutkittavan kohteen lämpötila- ja kosteusolosuhteet on selvitetty laskennallisen mallinnuksen tai mittausten avulla. Tunnin välein mitattujen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvojen perusteella voidaan arvioida homehtumisriskiä. Raja-arvoksi homeindeksille asetettiin laskelmissa tarkasteltavissa kohdissa homeindeksin arvo  $M < 1$ , joka tarkoittaa sitä, että homeen kasvua ei sallita kyseisissä kohdissa.

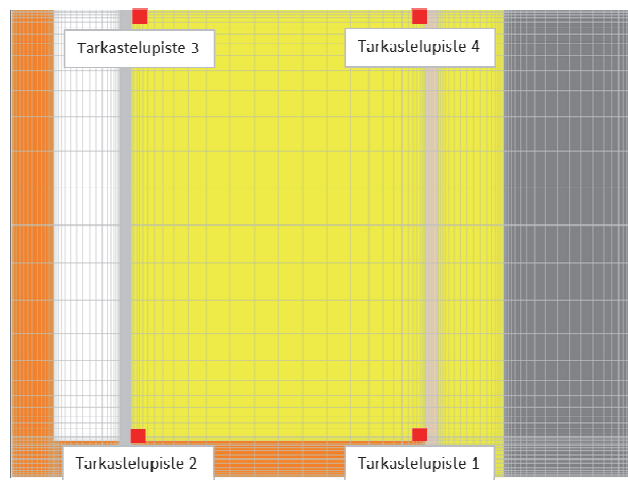
Homehtumisherkkyyssuokkina laskelmissa käytettiin luokkia HHL1-HHL3 riippuen tarkastelupisteen rajapinnan materiaaleista. Homehtumisherkkyyssuokka valittiin tarkastelupisteissä aina herkemmin homehtuvan materiaalin mukaan. Rajapinnoissa, joissa toinen materiaali oli puuta, käytettiin herkkyyssuokkaa HHL1, tuulensuojalelyn ja mineraalivillan rajapinnassa käytettiin herkkyyssuokkaa HHL2 ja pisteissä, joissa oli vain mineraalivillaa rajapintojen molemmin puolin, käytettiin herkkyyssuokkaa HHL3. Homeen kasvun taantumaluokkana käytettiin kaikissa tarkastelupisteissä luokkaa HTL2 merkittävä taantuma. Homeindeksin laskemiseen tarkoitettussa Excel-laskurissa on käytetty kappaleessa 5 lueteltuja kaavoja ja kappaleen 5 taulukoissa olevia laskennassa tarvittavia arvoja. Tehtyjen mallinnusten tuloksista kerättiin myös eri tarkastelupisteiden suurimmat suhteellisen kosteuden arvot. Raja-arvona kosteuden kondensoitumiselle pidettiin tarkasteluissa 97 % RH suhteellista kosteutta, jonka yläpuolella kosteuden oletettiin kondensoituvan rakenteessa. Rakenne ei ollut toimiva, jos jossain tarkastelupisteessä suhteellisen kosteuden arvo ylitti asetetun raja-arvon.

Työssä tarkastellut ulkoseinärakenteet olivat kaikki tuuletettuja. Rakenteessa olevan tuuletusvälin toimintaa kuvattiin tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden avulla. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuutena käytettiin laskennassa puuverhotuilla seinillä pohjoissuunnassa 100 vaihtoa tunnissa ja tiiliverhotuilla seinillä eteläjulkisivulla 10 vaihtoa tunnissa. Arvot on määritelty TTY:llä aiemmin tehdyissä tutkimuksissa ja lisää tietoja tuuletusraon ilmanvirtauksesta löytyy muun muassa lähteistä Mäkitalo (2012), Vinha (2007) sekä Vinha et al. (2013). Puuverhotuissa julkisivuissa tuuletusraon paksuus

oli keskimäärin 50 mm:ä, jolloin tuuletusraossa käytetty 100 vaihtoa tunnissa ilmanvaihtuvuus vastaa yhden kerroksen korkuisella (3 m) rakenteella ilman virtausnopeutta noin 0,08 m/s. Arvo vastaa TTY:llä tehdyssä kenttätutkimuksessa saatuja ilma- raon virtausnopeuden arvoja puujulkisivuille pohjoisseinällä. Kenttätutkimuksessa saatiin ilman virtausnopeuksien arvoja välillä 0,02–0,20 m/s lämpötilasta riippuen. (Vinha 2007) Tiiliverhotuille julkisivuille on tehty Ruotsissa, Lundin yliopistossa laajoja kenttämittauksia, joissa on normaali sääolosuhteissa saatu tuuletusrakojen ilmanvaihtuvuudeksi 0,3–8 vaihtoa tunnissa rakenteissa, joissa tuuletusraon paksuus on vaihdellut 20–50 mm välillä. (Mäkitalo 2012)

## 7.5 Valitut tarkastelupisteet

Tässä tutkimuksessa ei sallittu homeen kasvua kantavissa rakenteissa eikä niiden välissä olevissa tai sisäpuolisissa lämmöneristekerroksissa ( $M_{\max} < 1$ ). Kantavien rakenteiden korjaaminen tai vaihtaminen on tyypillisesti hyvin kallista, minkä lisäksi rakenteen sisäosissa olevien mikrobien ja niiden aineenvaihduntatuotteiden on helppo kulkeutua rakennuksen sisäilmaan rakenteiden mahdollisista epäjatkuvuuskohdista kuin rakenteiden ulko-osista. Kuvassa 7.2 on esitettyinä punaisilla suorakulmioilla kaikissa laskelmissa käytettyjen tarkastelupisteiden perussijainnit.



**Kuva 7.2** Laskelmissa käytettyjen tarkastelupisteiden perussijoittelu.

Kaikissa laskelmissa otettiin aina laskentaan mukaan kyseiset sijainnit lämmöneristeen sisäpinnassa ja ulkopinnassa. Tarkastelupisteinä käytettiin siis runkotolpan viereisiä lämmöneristekerroksen sisä- ja ulkopinnassa olevia yksittäisiä elementtejä sekä k-jaon keskellä olevia lämmöneristeen sisä- ja ulkopinnan yksittäisiä elementtejä. Homeindeksi näissä pisteissä laskettiin kuitenkin viereisen herkemman materiaalin mukaan. Tästä valinnasta on aiheutunut hieman virhettä puurangan reunaelementtien valintaan verrattuna, mutta tiheästä elementtijaosta johtuen lämpötila ja suhteellinen kosteus vierekkäisissä elementeissä ovat olleet vertailulaskelmien perusteella hyvin lähellä toisiaan ja elementin valinnasta aiheutunut virhe on ollut pieni.

## 8 TULOSTEN TARKASTELU

Tässä luvussa esitellään tutkimuksesta saadut tulokset ja tehdään tulosten tarkastelu. Luvussa 8.1 esitetään kaikkien tutkimuksessa mukana olleiden rakenteiden alkuperäiset rakennekuvat cad-kuvina ja alkuperäisten rakenteiden laskennasta saadut tulokset sekä nyky- että tulevaisuuden ilmastossa. Kappaleessa 8 esitetään myös rakenteista tehtyjen lisätarkastelujen tulokset.

### 8.1 Laskennan tulokset

Kappaleissa 8.1.1–8.1.10 on esitettynä diplomityössä tehtyjen laskelmien tulokset. Jokaisessa luvussa esitellään yhden rakennemallin laskennan tulokset. Tuloksissa esitetään rakenteiden eri tarkastelupisteiden homeindeksit sekä suhteellisen kosteuden maksimiarvot. Kappaleen 8.1 jokaisessa alaluvussa on ensimmäisenä alkuperäisen rakennemallin tulokset nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa ja tämän jälkeen tarvittaessa korjatun rakennemallin tulokset tilanteessa, jossa rakenne ei ole ollut toimiva, joko nykyilmastossa tai tulevaisuuden ilmastossa. Alkuperäisiä rakennemalleja laskennassa on 10 kappaletta ja yhteensä rakennemalleja on 18 kappaletta. Rakenteet on suunniteltu pääasiassa Oulun yliopiston arkkitehtuurin osastolla Kerrostalon korjauskurssilla arkkitehtiopiskelijoiden toimesta. Kahta tuloksissa esitettävää CLT-rakenteista ratkaisua ei ole suunniteltu Kerrostalon korjauskurssilla, mutta myös nämä rakenteet ovat arkkitehtiopiskelijan alun perin suunnittelemaa. Kaikissa rakenneleikkauksissa työssä käytetyt tarkastelupisteet on merkitty punaisilla ympyröillä ja numeroilla. Rakenneleikkauksien yhteydestä löytyvät myös kyseisen rakenteen materiaalikerrokset mittoineen ulkoa sisälle päin lueteltuna.

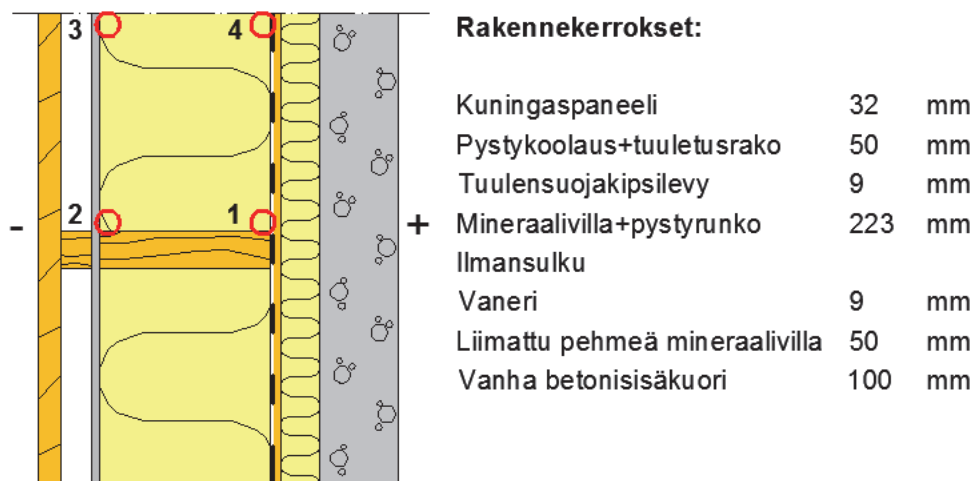
#### 8.1.1 Rakenne US 1, puuverhoiltu TES-elementti

##### Alkuperäinen versio US 1.1

Rakenne US 1.1 on korjausehdotus Asunto Oy Mustikkakankaan julkisivukorjausta varten. Asunto Oy Mustikkakangas on vuonna 1979 valmistunut pesubetonipintaisista elementeistä rakennettu asuinkerrostalo. Rakennus on pinnoiltaan huonossa kunnossa. Rakennus on suunniteltu laajennettavan korjauksen yhteydessä, parvekkeet on suunniteltu poistettavan ja tilalle on suunniteltu rakennettavan uudet ripustetut puiset parvekkeet. Julkisivuelementit kerrostaloon on suunniteltu TES-elementeistä rakennettuina ja julkisivujen pintamateriaaliksi on valittu kuningaspaneeli.

Julkisivukorjauksessa vanha seinärakenne poistetaan sisäkuoreen asti ja vanhaan sisäkuoreen kiinnitetään uudet TES-elementit, joissa on valmiiksi asennettuna uudet

energiatehokkaat ikkunat ja ovet. Rakenne kiinnitetään kerrostalon vanhaan sisäkuoreen sopivilla betonikiinnikkeillä. Pintaverhoilu on suunniteltu tehtävän työmaalla. TES-elementit on tarkoitus tuoda työmaalle esivalmistettuina ja elementteihin on asennettu valmiiksi palkkikengät uusien parvekkeiden asennusta varten. Ikkunoiden kohdalla julkisivumateriaalina on suunniteltu käytettävän kapeampaa ja paksumpaa puupaneelia. Paksummalla puupaneelilla verhoillun rakenteen laskentatulokset on esitetty seuraavassa kappaleessa. Kuvassa 8.1 on esitetty Asunto Oy Mustikkakan-kaan vanhan betonisen sisäkuoren päälle suunnitellun uuden julkisivuelementin rakenteen US 1.1 alkuperäinen rakenneleikkaus sekä materiaalikerrokset.



**Kuva 8.1** Rakenteen US1 alkuperäisen version US 1.1 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna.

Mallinnusta varten rakennetta yksinkertaistettiin kappaleessa 7.1 mainitulla tavalla. Laskenta suoritettiin Jokioisen ilmastoissa 2004 ja 2050 ja julkisivun tarkastelusuuntana käytettiin pohjoista. Tuuletusvälissä ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 100 l/h molemmissa ilmastoissa. Tarkastelupisteet sijaitsivat kuvan 8.1 mukaisesti rakenteen runkotolpan ulko- ja sisäreunassa mineraalivillan ja runkotolpan rajalla sekä runkotolppien k-jaon keskellä mineraalivillan ulko- ja sisäreunassa. Rakennekerroksissa oleva ilmansulku toteutettiin Delhin-ohjelmassa näennäisvastuksen avulla, jossa pystytään muuttamaan vastuksen diffuusiovastuslukua ja ilmanläpäisevyyden suuruutta. Vastuksen arvot asetettiin vastaamaan kirjallisuudesta löytyviä ilmansulkupaperien arvoja ja arvot on esitetty liitteessä 1. Kuningaspaneeli, runkotolpat ja koolaus mallinnettiin rakenteeseen kuusena (ks. liite 1). Tasausvilla ja lämmöneristeenä käytettävä eriste mallinnettiin molemmat mineraalivillana. Vaneri, joka rakenteessa on sisäreunassa jäykisteenä, mallinnettiin kuusivanerilevynä. Näidenkin rakenneosien materiaaliominaisuudet löytyvät liitteestä 1.

Taulukossa 8.1 on esitetty rakenteen US 1.1 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot kaikissa tarkastelupisteissä nyky- ja tulevaisuuden ilmastoissa. Rakenteessa US 1.1 suhteellisen kosteuden maksimiarvot ovat korkeat rakenteen ul-

ko-osissa, missä myös homeindeksin arvot nousevat tulevaisuuden ilmastossa yli sallitun rajan  $M < 1$  (tarkastelupisteet 2 ja 3). Homeindeksi on yli sallitun rajan myös nykyilmastossa tarkastelupisteessä 2, eli runkotolpan ulkoreunassa ja tarkastelupisteessä 3 nykyilmastossa homeindeksi on lähellä raja-arvoa 1. Tämän vuoksi rakenne US 1.1 ei ole toimiva rakenne.

**Taulukko 8.1** Rakenteen US 1.1 homeindeksien maksimi-arvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

| Alkuperäinen rakenne |     | Jokioinen 2004     |           | Jokioinen 2050     |           |
|----------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Tarkastelupiste      | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] |
| 1                    | 1   | 0.02               | 85.5      | 0.10               | 87.7      |
| 2                    | 1   | 1.41               | 91.3      | 1.85               | 92.2      |
| 3                    | 2   | 0.92               | 96.5      | 1.11               | 96.9      |
| 4                    | 1   | 0.16               | 93.8      | 0.36               | 96.4      |

Suhteellinen kosteus pysyy tarkasteluvuotena nykyilmastossa alle 97 % RH, mutta on silti korkea ja pysyttelee pitkään yli 90 % RH pisteissä 2 ja 3. Tarkastelupisteissä 1 ja 4 eli rakenteen sisäosassa suhteellisen kosteuden arvot ovat hieman matalampia. VTT:n ja TTY:n kehittämän parannetun homemallin mukaisesti kriittinen suhteellisen kosteuden raja homeen kasvun kannalta on 80 % RH, jonka alapuolella mallin mukaan homeen kasvua ei tapahdu. Rakenteessa US 1.1 kaikissa tarkastelupisteissä suhteellisen kosteuden maksimi-arvo nousee kuitenkin yli 80 % RH ja homeindeksit saavat nollaa suurempia arvoja. Tulevaisuuden ilmastossa suhteellinen kosteus nousee lämmöneristeen ja tuulensuojalevyn rajapinnassa lähes arvoon 97 % RH. Homeindeksi nousee myös samassa pisteessä yli sallitun raja-arvon.

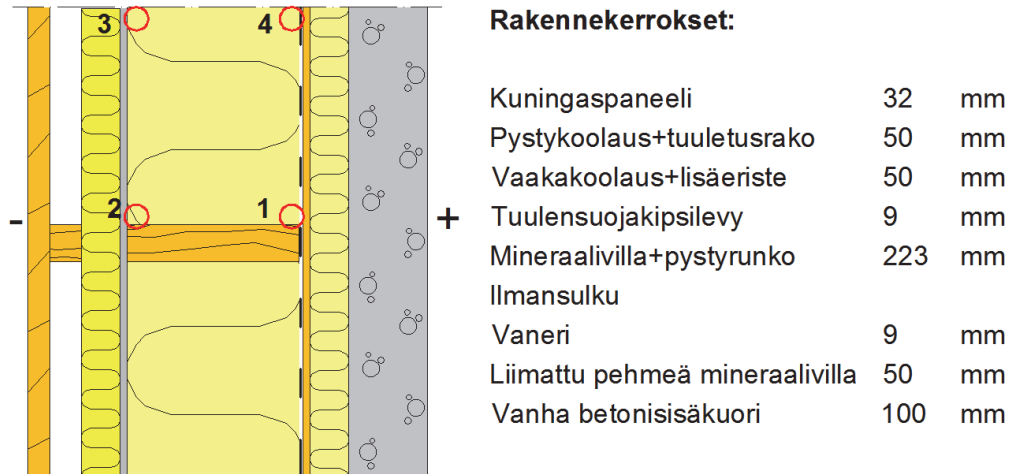
Tarkastelupisteissä käytetyt homehtumisherkkyyssluokan arvot on esitetty taulukossa 8.1. Vastaavaa periaatetta on käytetty myös muissa tämän luvun tulostaulukoissa. Rakenteessa US 1.1 homehtumisherkkyyssluokkana käytettiin kaikissa muissa tarkastelupisteissä luokkaa HHL1 paitsi tarkastelupisteessä 3, jossa pisteen rajapintamateriaaleina olivat mineraalivilla ja tuulensuojakipsilevy. Tässä tilanteessa homehtumisherkkyyssluokaksi valittiin HHL2 herkemman materiaalin eli kipsilevyn mukaan. Käytettäessä tuulensuojalevynä tuulensuojakipsilevyä (ks. liite 1) on tuulensuojan lämmönvastus liian vähäinen, jolloin rakenteen ulkopinnan lämpötila laskee. Yhdessä korkean suhteellisen kosteuden kanssa tuulensuojalevyn ja rungon ulko-osan rajapintaan syntyy otolliset olosuhteet homeen kasvulle. Rakenne US 1.1 ei ole toimiva rakenneratkaisu.

### Korjattu versio US 1.2

Rakennetta US 1.1 korjattiin lisäämällä rakenteeseen 50 mm paksuinen lisäeristekerros tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelle. Lisäeriste mallinnettiin laskuissa mineraalivillana (ks. liite 1). Lisäämällä mineraalivillaa tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelle



rakenteen ulko-osan lämmönvastus nousee ja lämpötila rungon ulkopinnassa nousee. Laskenta suoritettiin Jokioisen ilmastoissa 2004 ja 2050 ja julkisivun tarkastelusuuntana käytettiin pohjoista. Tuuletusvälissä ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 100 l/h molemmissa ilmastoissa. Kuvassa 8.2 on esitetty rakenteen US 1.1 korjatun version US 1.2:n rakenneleikkaus ja materiaalikerrokset.



**Kuva 8.2** Rakenteen US1.1 korjatun version US 1.2 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna.

Taulukossa 8.2 on esitetty rakenteen US 1.2 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot tarkastelupisteissä nyky- ja tulevaisuuden ilmastoissa. Taulukosta voidaan havaita, että homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien arvot eivät nouse korjatun version tarkastelupisteissä missään kohdassa raja-arvojen yläpuolelle.

**Taulukko 8.2** Rakenteen US 1.2 homeindeksien maksimi-arvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

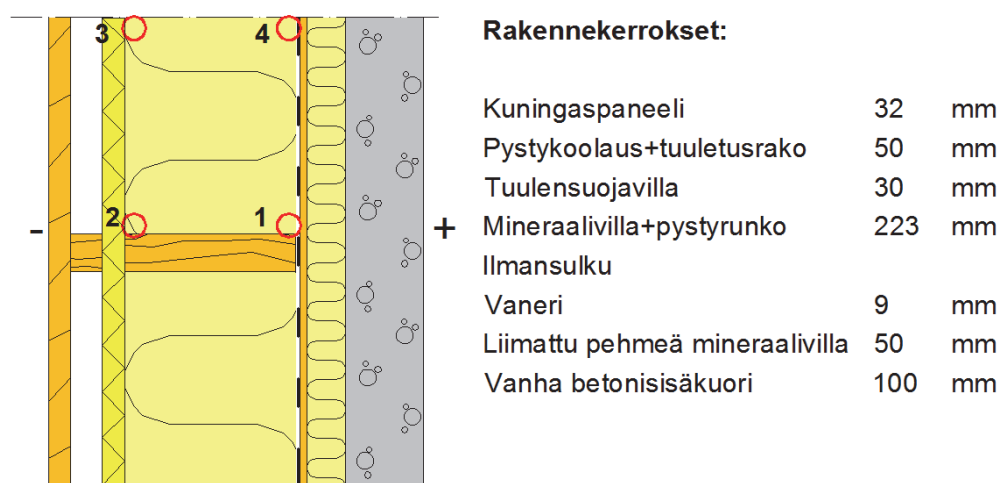
| Korjattu rakenne |     | Jokioinen 2004     |           | Jokioinen 2050     |           |
|------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Tarkastelupiste  | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] |
| 1                | 1   | 0.01               | 83,4      | 0.05               | 86.1      |
| 2                | 1   | 0.27               | 86,8      | 0.40               | 87.6      |
| 3                | 2   | 0.31               | 92,5      | 0.38               | 93.0      |
| 4                | 1   | 0.09               | 91,7      | 0.25               | 94.2      |

Laskentatarkasteluissa käytetyn pelkän 9 mm paksun tuulensuojakipsilevyn lämmönvastus on yksinään noin 0,045 (m<sup>2</sup>·K)/W, kun taas tuulensuojakipsilevyn ja 50 mm lisäeristeen lämmönvastus on yhteensä noin 1,295 (m<sup>2</sup>·K)/W. Lämpötilan nousu laskee ilman suhteellista kosteutta rungon ulkopinnassa, jolloin olosuhteet homeen kasvulle muuttuvat epäsuotuisiksi. Suhteellisen kosteuden maksimi-arvot ovat kuitenkin yli 80 % RH kaikissa tarkastelupisteissä sekä nyky- että tulevaisuuden ilmastossa. Tarkastelupisteissä ei kuitenkaan havaita homeen kasvua, koska ajanjaksot, jol-

loin sekä lämpötila että suhteellinen kosteus olisivat homeen kasvulle suotuisat, ovat liian lyhyitä. Rakenne US 1.2 on toimiva rakenneratkaisu.

### Korjattu versio US 1.3

Rakennetta US 1.1 kokeiltiin korjata myös asettamalla tuulensuojakipsilevyn ja lisäeristeen tilalle jäykkä 30 mm tuulensuojavilla. Tuulensuojavillana voitaisiin käyttää esimerkiksi Isover RKL-31 Facade -tuulensuojavillaa. Jäykällä tuulensuojavillalla voidaan korvata tuulensuojakipsilevy suoraan eikä muita muutoksia rakenteisiin tarvitse tehdä. Kuvassa 8.3 on esitetty rakenteen US 1.3 rakenneleikkaus, materiaalikerrokset ja tarkastelupisteet.



**Kuva 8.3** Rakenteen US1.1 korjatun version US1.3 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna.

Mallinnuksessa tuulensuojavillan päälle asennettiin tuulensuojapinnaksi näennäisvastus. Tuulensuojavillan ja näennäisvastuksen materiaaliominaisuudet löytyvät liitteestä 1. Taulukossa 8.3 on esitetty rakenteen US 1.3 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot tarkastelupisteissä nyky- ja tulevaisuuden ilmastoissa.

**Taulukko 8.3** Rakenteen US 1.3 homeindeksien maksimiarvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimiarvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

| Korjattu rakenne |     | Jokioinen 2004     |           | Jokioinen 2050     |           |
|------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Tarkastelupiste  | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] |
| 1                | 1   | 0.00               | 82.7      | 0.04               | 85.4      |
| 2                | 1   | 0.22               | 86.0      | 0.32               | 86.8      |
| 3                | 3   | 0.01               | 93.5      | 0.44               | 93.6      |
| 4                | 1   | 0.07               | 91.4      | 0.20               | 93.4      |

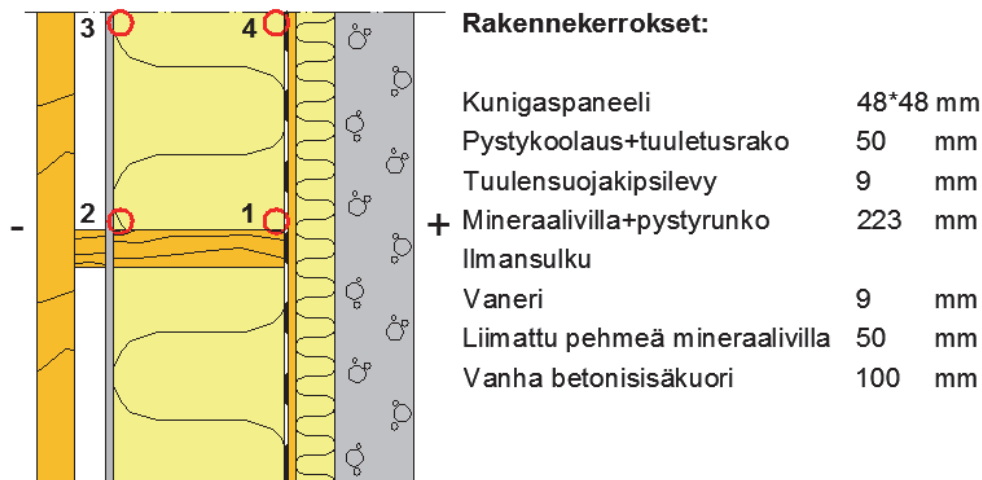
Taulukosta voidaan havaita, että homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien arvot eivät nouse myöskään korjatun version US 1.3 tarkastelupisteissä missään kohdassa.

raja-arvojen yläpuolelle. Vaikka suhteellisen kosteuden arvot nousevat melko korkeiksi tarkastelupisteessä 3, pysyy suhteellinen kosteus kuitenkin kaikissa tarkastelupisteissä kosteuden kondensoitumisen raja-arvon alapuolella, jolloin kosteuden tiivistymistä ei rakenteessa tapahdu. Rakenne US 1.3 on toimiva rakenneratkaisu.

### 8.1.2 Rakenne US 2, puuverhoiltu TES-elementti

#### Alkuperäinen versio US 2.1

Rakenne US 2.1 on suunniteltu myös Asunto Oy Mustikkakankaan korjausratkaisuksi. Elementti on rakenteeltaan muuten täysin vastaava kuin rakenne US 1.1, mutta julkisivuverhous on erilainen. Asunto Oy Mustikkakankaan suunnitelmissa pintaverhous on suunniteltu tehtäväksi työmaalla, joten vanhan betonisandwich-elementin päälle tuleva pelkkä julkisivuelementti on samanlainen rakenteissa US 1.1 ja US 2.1. Rakenteessa US 2.1 julkisivun pintamateriaalina on kapeampi puupaneeli kuin rakenteessa US 1.1 oleva kuningaspaneeli, mutta paneelin paksuus on suurempi. Julkisivuverhouksen paneelin paksuus on rakenteessa US 1.1 32 mm:ä, kun taas rakenteessa US 2.1 paksuus on 48 mm:ä. Paksumpi julkisivuverhous on ajateltu asennettavaksi ikkunoiden yhteyteen ikkunoiden alapuolelle ikkunoiden levyisenä alueena. Kuvassa 8.4 on esitetty kerrostaloon suunnitellun julkisivuelementin rakenneleikkaus sekä materiaalikerrokset.



**Kuva 8.4** Rakenteen US2.1 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna.

Laskenta suoritettiin Jokioisen ilmastoissa 2004 ja 2050 ja julkisivun tarkastelusuuntana käytettiin pohjoista. Tuuletusvälissä ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 100 l/h molemmissa ilmastoissa. Julkisivuverhous mallinnettiin laskennassa yhtenäisenä 48 mm:ä paksuna käsittelemättömänä kuusipaneelina (ks. liite 1). Paksumpi julkisivuverhous saa aikaan sen, että viistosaderasitus rakenteeseen vähenee, jolloin olosuhteet rakenteen rungon ulko-osissa paranevat. Laskuista havaittiin myös, että paksumpi julkisivuverhous nosti hieman lämpötilaa ja laski suhteellista kosteutta rungon ulko-osissa.

Rakenteen US 2.1 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot on esitetty taulukossa 8.4. Kuten taulukosta voidaan havaita, ovat sekä homeindeksien että suhteellisten kosteuksien arvot tarkastelupisteissä raja-arvojen alapuolella. Suhteellisen kosteuden maksimi-arvot ovat kuitenkin yli 80 % RH nykyilmastossa sekä tulevaisuuden ilmastossa tarkastelupisteissä 2 ja 3. Tarkastelupisteissä ei kuitenkaan havaita homeen kasvua.

**Taulukko 8.4** Rakenteen US 2.1 homeindeksien maksimi-arvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

| Alkuperäinen rakenne |     | Jokioinen 2004     |           | Jokioinen 2050     |           |
|----------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Tarkastelupiste      | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] |
| 1                    | 1   | 0.00               | 81.5      | 0.02               | 84.5      |
| 2                    | 1   | 0.60               | 90.0      | 0.74               | 91.0      |
| 3                    | 2   | 0.56               | 95.9      | 0.83               | 96.2      |
| 4                    | 1   | 0.04               | 90.0      | 0.13               | 93.0      |

Tulevaisuuden ilmastossa rakenteessa US 2.1 tarkastelupisteessä 3 homeindeksi on kuitenkin melko korkea, joten rakenne kannattaisi myös tässä tilanteessa toteuttaa vastaavasti kuin rakenteen US 1.2 kohdalla, eli lisäämällä tuulensuojakipsilevyn taakse lisälämmöneriste.

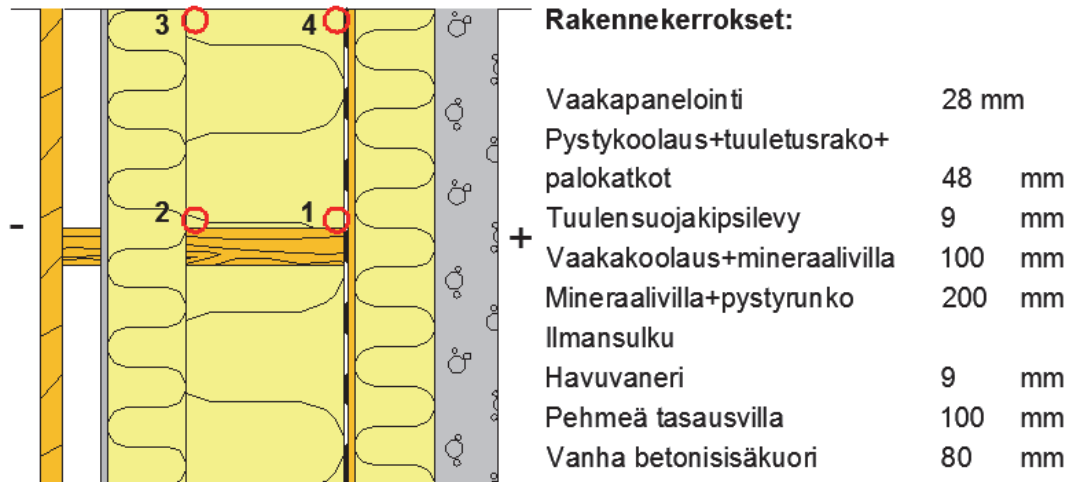
Rakenteesta US 2.1 tehtiin testilaskenta, jossa lisäeriste oli mukana tuulensuojalevyn päällä. Testilaskennassa rakenteen tulokset paranivat huomattavasti. Nykyilmastossa rakenteen homeindeksit laskivat kaikissa tarkastelupisteissä lähelle nollaa ja suhteellisen kosteuden arvot olivat alle 90 % RH kaikissa pisteissä. Nykyilmastossa homeindeksi nousi suurimmillaan arvoon 0,06 tarkastelupisteessä 3. Tulevaisuuden ilmastossa homeindeksi nousi puolestaan suurimmillaan arvoon 0,11 tarkastelupisteessä 3. Jos kohteen julkisivuelementit tehdään valmiiksi tehtaalla, mutta julkisivuverhous asennetaan vasta työmaalla, kannattaa julkisivuelementeistä tehdä rungoltaan rakenteiden US 1.2 mukaisia. Rakenne US 2.1 on kuitenkin ilman lisäeristettäkin toimiva rakenneratkaisu sekä nyky- että tulevaisuuden ilmastossa.

### 8.1.3 Rakenne US 3, puuverhoiltu TES-elementti

#### Alkuperäinen versio US 3.1

Rakenne US 3.1 on Asunto Oy Säästölantti julkisivukorjausta varten ehdotettu julkisivuelementti. As Oy Säästölantti on vuonna 1970 valmistunut teräsbetonisista sandwich-ruutuelementeistä rakennettu asuinkerrostalo. Julkisivut on suunniteltu korjattavan siten, että vanha ulkokuori ja vanha lämmöneristys puretaan betonielementeistä ja vanhan sandwich-elementin sisäkuoreen kiinnitetään puurunkoiset TES-julkisivuelementit. Kuvassa 8.5 on esitetty kerrostaloon suunnitellun uuden julkisi-

vun alkuperäinen rakenneleikkaus yhdessä vanhan sisäkuoren kanssa sekä materiaa-  
likerrokset.



**Kuva 8.5** Rakenteen US 3.1 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna.

Laskenta suoritettiin Jokioisen ilmastoissa 2004 ja 2050 ja julkisivun tarkastelusuunn-  
tana käytettiin pohjoista. Tuuletusvälissä ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 100  
l/h molemmissa ilmastoissa. Julkisivumateriaaliksi TES-elementeissä on suunniteltu  
käsittelemätön lehtikuusipaneeli ja saumaton rappaus, joka on toteutettu tuuletetulla  
rappauslevyllä. Rappauslevyllä toteutetun rakenteen tulokset esitetään seuraavassa  
kappaleessa 8.1.4. Ilmansulku rakenteessa US 3.1 on mallinnuksessa toteutettu vas-  
taavasti kuin rakenteessa US 1, eli näennäsvastuksella (ks. liite 1). Rakenne US 3.1  
on materiaa-  
likerroksiltaan vastaavanlainen kuin rakenne US 1.2, mutta rakenneker-  
rosten paksuudet ja sijainnit ovat erilaiset. Rakenteessa US 3.1 on enemmän tasaus-  
villaa (50 mm vs 100 mm) ja enemmän rungon ulkopuolista lisäeristettä (50 mm vs  
100 mm). Rakenteen julkisivuverhous on myös 4 mm ohuempi ja vanha sisäkuori 20  
mm ohuempi. Merkittävimmät muutokset tässä tapauksessa aiheutuivat lisäeristeen  
ja tasausvillan määrien lisäämisestä.

Taulukossa 8.5 on esitetty rakenteen US 3.1 homeindeksien ja suhteellisten kosteuk-  
sien suurimmat arvot tarkastelupisteissä. Taulukosta havaitaan, että homeindeksit ja  
suhteelliset kosteudet pysyvät raja-arvojen alapuolella kaikissa tarkastelupisteissä  
sekä nyky- että tulevaisuuden ilmastossa. Laskelmien tuloksista voidaan havaita, että  
lisäeristeen paksuuden kasvattaminen rungon ulkopuolella pienentää homeindeksiä  
entisestään tarkastelupisteissä 2 ja 3 verrattuna rakenteeseen US 1.2. Kuitenkin tar-  
kastelupisteissä 1 ja 4 homeindeksit ja suhteellisen kosteuden arvot nousevat verrat-  
tuna US 1.2:een.

**Taulukko 8.5** Rakenteen US 3.1 homeindeksien maksimi-arvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

| Alkuperäinen rakenne |     | Jokioinen 2004     |           | Jokioinen 2050     |           |
|----------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Tarkastelupiste      | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] |
| 1                    | 1   | 0.01               | 83.4      | 0.05               | 85.8      |
| 2                    | 1   | 0.10               | 87.9      | 0.15               | 88.9      |
| 3                    | 3   | 0.01               | 90.1      | 0.02               | 91.1      |
| 4                    | 1   | 0.10               | 91.7      | 0.24               | 93.8      |

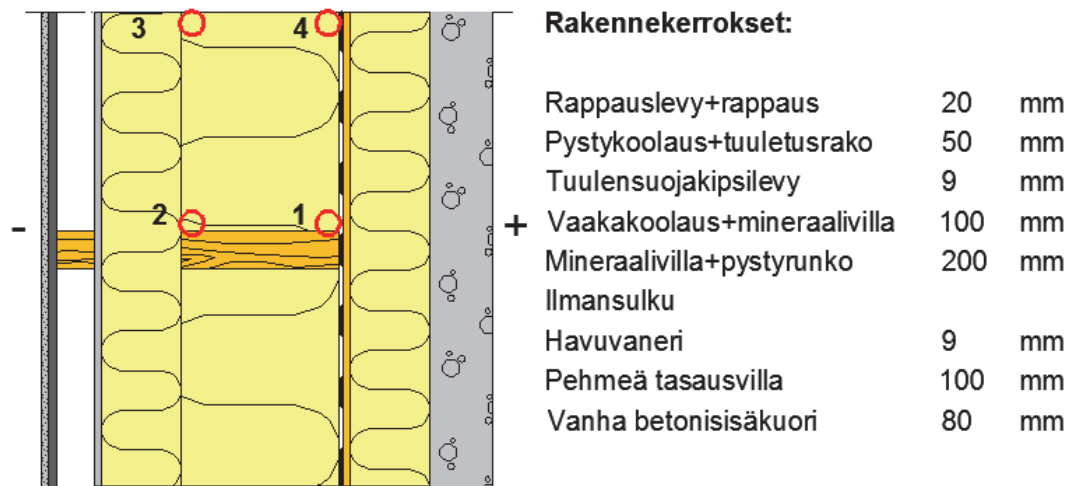
Tasausvillan määrän lisääminen julkisivuelementin ja vanhan sisäkuoren välissä viilentää rungon sisäosaa. Lämpötilan laskun myötä myös suhteellinen kosteus tarkastelupisteissä 1 ja 4 nousee, jolloin homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot kasvavat. Arvojen nousu on kuitenkin niin vähäistä ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvojen esiintyminen niin hetkellisiä, että homeen kasvulle olosuhteet pysyvät epäsuotuisina tarkasteluvuoden aikana.

Vaikka laskennan tulokset rakenteesta US 3.1 ovat hyvät, ei rakenne kuitenkaan välttämättä ole toimiva rakenneratkaisu, koska uloimmat tarkastelupisteet eivät olleet rakenteessa virheestä johtuen kaikkein kriittisimmissä pisteissä tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa. Tarkastelupisteet olivat kuitenkin kantavan rungon ulkopinnassa, kuten aiemmin on määrätty, mutta tällöin myös tuulensuojakipsilevyn olisi pitänyt olla rungon ulkopinnassa ja lisäeristeen kipsilevyn ulkopuolella. Jos tarkastelupisteet siirrettäisiin nykyisessä rakenteessa kipsilevyn sisäpintaan, homeindeksien arvot nousisivat todennäköisesti tarkastelupisteissä 2 ja 3 yli raja-arvon. Rakenteen toimivuuden varmistamiseksi on syytä tehdä lisälaskenta, jotta saadaan täysi varmuus rakenteen toimivuudesta esimerkiksi tilanteessa, jossa tuulensuojakipsilevy siirrettäisiin rungon ulkopintaan ja lisäeriste asetettaisiin kipsilevyn ulkopuolelle. Lisälaskentaa ei tämän diplomityön puitteissa ehditty tekemään.

#### 8.1.4 Rakenne US 4, rapattu TES-elementti

##### Alkuperäinen versio US 4.1

Rakenne US 4.1 on ehdotus Asunto Oy Säästölantissa käytettäväksi toiseksi seinäratkaisuksi. Elementti on rakenteeltaan muuten täysin vastaava kuin rakenne US 3.1, mutta julkisivuverhous on erilainen. Julkisivuelementtien pintamateriaaleiksi on suunniteltu As Oy Säästölantissa sekä puuverhous että rapattu julkisivuverhous. Rakenne US 4.1 on rapatulla julkisivuverhouksella toteutettu rakenne. Julkisivuverhous on toteutettu tuuletettuna levyrappauksena. Mallinnuksessa rappauksen alustana toimi sementtipohjainen rappauslevy ja rappauksena käytettiin kalkkisementtipohjaista rappauslaastia (ks. liite 1). Kuvassa 8.6 on esitetty kerrostaloon suunnitellun julkisivuelementin rakenneleikkaus sekä materiaalikerrokset



**Kuva 8.6** Rakenteen US 4.1 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna.

Laskenta suoritettiin Jokioisen ilmastoissa 2004 ja 2050 ja julkisivun tarkastelusuunnana käytettiin pohjoista. Tuuletusvälissä ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 100 l/h molemmissa ilmastoissa. Taulukossa 8.6 on esitetty rakenteen US 4.1 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot tarkastelupisteissä.

**Taulukko 8.6** Rakenteen US 4.1 homeindeksien maksimi-arvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

| Alkuperäinen rakenne |     | Jokioinen 2004     |           | Jokioinen 2050     |           |
|----------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Tarkastelupiste      | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] |
| 1                    | 1   | 0.00               | 82.3      | 0.01               | 84.6      |
| 2                    | 1   | 0.05               | 87.6      | 0.07               | 88.6      |
| 3                    | 3   | 0.00               | 90.3      | 0.01               | 91.0      |
| 4                    | 1   | 0.05               | 91.5      | 0.11               | 93.6      |

Taulukosta havaitaan, että homeindeksit ja suhteelliset kosteudet pysyvät raja-arvojen sisäpuolella kaikissa tarkastelupisteissä sekä nyky- että tulevaisuuden ilmastossa. Homeindeksit pysyvät koko tarkasteluvuoden ajan arvossa 0 ja myös suhteellisen kosteuden maksimi-arvot ovat kriittisen RH:n alapuolella tarkastelupisteissä 1 ja 2. Tarkastelupisteissä 3 ja 4 suhteellisen kosteuden maksimi-arvot ovat yli 80 % RH nykyilmastossa sekä tulevaisuuden ilmastossa. Tarkastelupisteissä ei kuitenkaan havaita homeen kasvua.

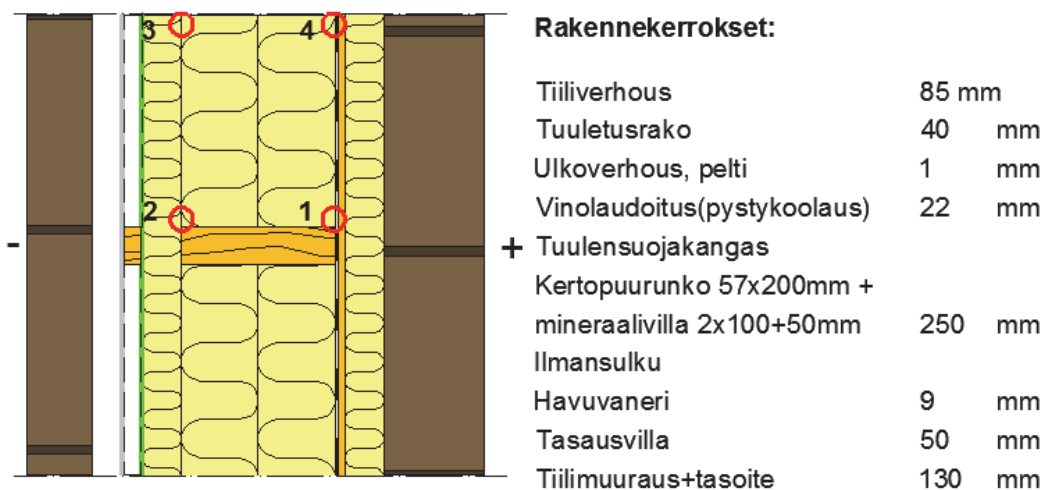
Myös rakenteen US 4.1 kohdalla on mahdollisuus, että rakenne ei ole toimiva rakenneratkaisu, koska rakenteessa tarkastelupisteet eivät olleet laskennoissa kaikkein kriittisimmissä pisteissä tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa. Tarkastelupisteet olivat kantavan rungon ulkopinnassa, kuten aiemmin on määrätty, mutta tällöin myös tuulensuojakipsilevyn olisi pitänyt olla rungon ulkopinnassa ja lisäeristeen kipsilevyn ulkopuolella. Jos tarkastelupisteet siirrettäisiin nykyisessä rakenteessa kipsilevyn si-

säpintaan, homeindeksien arvot nousisivat todennäköisesti tarkastelupisteissä 2 ja 3 yli raja-arvon. Rakenteen toimivuuden varmistamiseksi on syytä tehdä tälläkin rakenteella lisälaskenta, jotta saadaan täysi varmuus rakenteen toimivuudesta. Lisälaskentaa ei tämän diplomityön puitteissa ehditty tekemään.

### 8.1.5 Rakenne US 5, tiiliverhoiltu TES-elementti

#### Alkuperäinen versio US 5.1

Rakenne US 5.1 on tiiliverhottu TES-elementti, jota on ehdotettu As Oy Kaukometsän julkisivukorjaukseen. Kohteen alkuperäinen julkisivuverhous on tiiltä, joten myös uusi julkisivuverhous on suunniteltu tehtävän tiilestä. Rakennuksen julkisivukorjausta varten suunniteltu TES-elementti asennetaan vanhan muuratun sisäkuoren päälle. TES-elementissä on peltijulkisivuverhous, joka muodostaa elementtiin niin sanotun sadetakkirakenteen. Julkisivuelementissä on myös muuraussiteet valmiina paikalla muurattavaa julkisivua varten. TES-elementit on suunniteltu kolmen kerroksen korkuisina ja elementtien reunat toteutetaan siten, että erillistä elementtisaumaus- ta ei tarvita, vaan höyrynsulku, tuulensuojakangas ja peltijulkisivu limittyvät muodostaen tiiviit kerrokset. As Oy Kaukometsään on suunniteltu parvekkeiden taustaseinien julkisivumateriaaliksi käsittelemätön kuusilautaverhous. Lautaverhotun rakenteen laskentatulokset on esitetty kappaleessa 8.1.6. Kuvassa 8.7 on esitetty rakenteen US 5.1 leikkauskuva ja materiaalikerrokset.



**Kuva 8.7** Rakenteen US 5.1 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna.

Rakenteen US 5.1 laskenta suoritettiin Vantaan 2007 ja 2050 ilmastoissa ja julkisivun tarkastelusuuntana käytettiin etelää. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuutena käytettiin 10 l/h. Ilmansuuntana rakenteen US 5.1 laskennassa käytettiin etelää siksi, että viistosade on voimakkainta eteläisellä seinällä. Eteläseinällä myös auringonsäteily lisää diffuusion vaikutuksella siirtyvän kosteuden määrää ulkoverhouksesta rakenteen sisäosiin, koska ilmaraon lämpötila kasvaa auringonsäteilyn vaikutuksesta ja tuuletusvälin ilmavirtaus lisääntyy. Julkisivuverhous mallinnettiin laskennassa yhtenäisenä



85 mm paksuna pinnoittamattomana tiilenä (ks. liite 1). Sisäkuori mallinnettiin maalattuna 130 mm paksuna yhtenäisenä tiilimuurina. Maalipinnan vaikutus otettiin huomioon laskentaohjelmassa vesihöyrynvastuksen avulla. Rakennekerroksissa olevat ilmansulku ja sadetakkirakenteen pelti toteutettiin Delhin-ohjelmassa näennäisvastuksien avulla. Näennäisvastuksien arvot löytyvät liitteestä 1. Näennäisvastusten vesihöyryn-, ilman- ja vedenläpäisevyyden arvot vastaavat oikeiden materiaalien vastaavia arvoja.

Taulukossa 8.7 on esitetty rakenteen US 5.1 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot tarkastelupisteissä. Taulukosta havaitaan, että homeindeksit ja suhteelliset kosteudet pysyvät raja-arvojen alapuolella kaikissa tarkastelupisteissä sekä nyky- että tulevaisuuden ilmastossa.

**Taulukko 8.7** Rakenteen US 5.1 homeindeksien maksimi-arvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

| Alkuperäinen rakenne |     | Vantaa 2007        |           | Vantaa 2050        |           |
|----------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Tarkastelupiste      | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] |
| 1                    | 1   | 0                  | 69.0      | 0                  | 72.7      |
| 2                    | 1   | 0                  | 75.9      | 0                  | 78.5      |
| 3                    | 3   | 0                  | 81.8      | 0                  | 84.3      |
| 4                    | 1   | 0                  | 74.7      | 0                  | 78.5      |

Homeindeksit pysyvät koko tarkasteluvuoden ajan arvossa 0 ja myös suhteellisen kosteuden maksimi-arvot ovat pääasiassa kriittisen RH:n alapuolella. Rakenteen rungon ulko-osassa tarkastelupisteessä 3 suhteellinen kosteus nousee korkeammaksi kuin tarkastelupisteessä 2 todennäköisesti siksi, että tarkastelupisteessä 3 kohdalla ei ole materiaaleja, jotka pystyisivät sitomaan vettä itseensä. Tarkastelupisteessä 2 puurunko ja koolaus ovat aivan tarkastelupisteessä vieressä ja hygroskooppisina materiaaleina madaltavat suhteellisen kosteuden huippuarvoja ympäristössään.

Rakenteessa US 5.1 sadetakkirakenne saa aikaan sen, että ulkoilmasta aiheutuva kosteusrasitus rakenteen sisäosiin on hyvin pieni. Sadetakkirakenteessa on tuuletusväli sekä sisä- että ulkopuolella, jolloin myös sisältä tuleva kosteus pääsee kuivumaan rakenteesta eikä pääse kondensoitumaan tuulensuojakankaan ja peltiverhouksen väliin. Tällainen rakenneratkaisu on todettu FRAME-projektissa toimivaksi korkeilla (> 10 m) tiiliverhotuilla puurankarunkoisilla seinärakenteilla.

Vastaavasti rakenteen US 5.1 kohdalla on hyvistä tuloksista huolimatta mahdollisuus, että rakenne ei ole toimiva rakenneratkaisu, koska rakenteessa tarkastelupisteet eivät olleet laskennoissa kaikkein kriittisimmissä pisteissä tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa. Tässäkin rakenteessa tarkastelupisteet olivat kantavan rungon ulkopin-

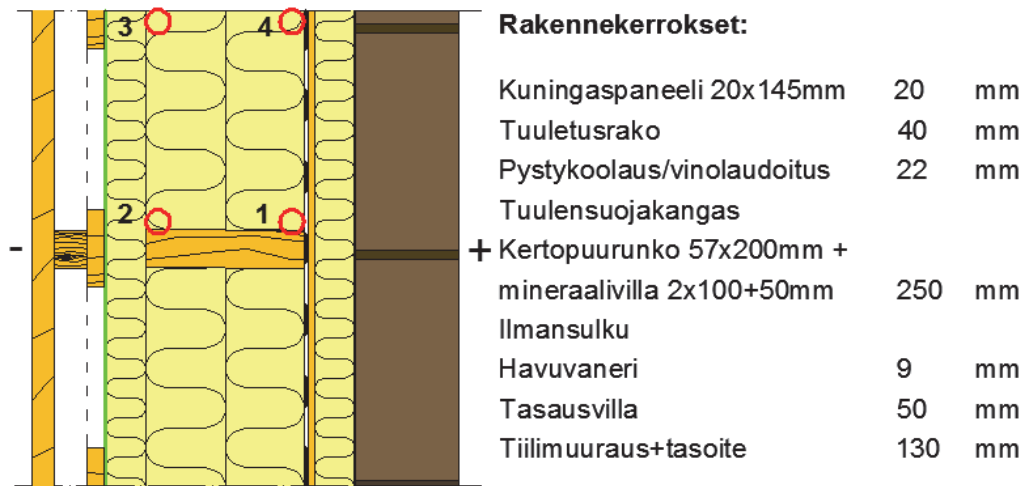
nassa, kuten aiemmin on määrätty, mutta tällöin myös tuulensuojakankaan olisi pitänyt olla rungon ulkopinnassa ja lisäeristeen tuulensuojan ulkopuolella. Jos tarkastelupisteet siirrettäisiin nykyisessä rakenteessa tuulensuojakankaan sisäpintaan, homeindeksien arvot nousisivat todennäköisesti tarkastelupisteissä 2 ja 3 yli raja-arvon. Muihin laskentatarkasteluihin perustuen rakenne on kuitenkin mahdollisesti toimiva, jos lisäeristeen ja tuulensuojakankaan paikkaa vaihdetaan. Rakenteen toimivuuden varmistamiseksi on syytä tehdä lisälaskenta, jotta saadaan täysi varmuus rakenteen toimivuudesta. Lisälaskentaa ei tämän diplomityön puitteissa ehditty tekemään.

Jos elementin kantavan rungon ulkopuolella oleva lämmöneriste olisi tuulensuojaeriste, sen ilmanläpäisevyys olisi oleellisesti pienempi kuin tavallisen lämmöneristeenä toimivan mineraalivillan. Tällöin rakenteen ulko-osan tarkastelupisteet olisivat oikeassa kohdassa, koska voidaan olettaa, että tällöin tuulensuojakankaan sisäpinnassa kasvavat homeet eivät pääse lämmöneristekerrokseen kovin helposti. Tässä tilanteessa tuulensuojakankaan sisäpuolella on tavallista lämmöneristettä, joten riski homeiden kulkeutumiseen on suurempi. Tuulensuojakankaan käyttö ei kuitenkaan ole RIL 107-2012 (2012) mukaan hyväksyttävää puurunkoisissa ulkoseinissä, joten rakenteeseen kannattaisi joka tapauksessa vaihtaa tuulensuojakankaan ja lisäeristevillan tilalle tuulensuojapinoitettu villa.

### **8.1.6 Rakenne US 6, puuverhoiltu TES-elementti**

#### **Alkuperäinen versio US 6.1**

Rakennetta US 6.1 on ehdotettu myös Asunto Oy Kaukometsän korjausratkaisuksi. TES-elementti on rakenteeltaan muuten täysin vastaava kuin rakenteessa US 5.1, mutta julkisivuverhous on puuta ja rakenteessa US 6.1 ei ole sadetakkirakennetta. Rakenteen verhouksena on suunniteltu käytettävän 20 mm paksua kuningaspaneelia. Kuningaspaneeli mallinnettiin laskelmissa kuusena (ks. liite 1). Rakenteessa myös pystyrunko, lisäeristeen vaakakoolaus, vinolaudoitus ja pystykoolaus mallinnettiin kuusena. TES-elementtien julkisivuverhous on suunniteltu tehtävän työmaalla, joten elementit voidaan tehdä koko rakennukseen pääosin samanlaisina. Kuvassa 8.8 on esitetty rakenteen US 6.1 leikkauskuva ja materiaalikerrokset.



**Kuva 8.8** Rakenteen US 6.1 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna.

Taulukossa 8.8 on esitetty rakenteen US 6.1 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot tarkastelupisteissä. Taulukosta havaitaan, että homeindeksit ja suhteelliset kosteudet pysyvät raja-arvojen alapuolella kaikissa tarkastelupisteissä nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa. Ilmastona rakenteen US 6.1 mallinnuksessa käytettiin Jokioisen ilmastotiedostoja 2004 ja 2050. Tuuletusvälissä ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 100 1/h molemmissa ilmastoissa.

**Taulukko 8.8** Rakenteen US 6.1 homeindeksien maksimi-arvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

| Alkuperäinen rakenne |     | Jokioinen 2004     |           | Jokioinen 2050     |           |
|----------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Tarkastelupiste      | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] |
| 1                    | 1   | 0.01               | 84.3      | 0.08               | 86.6      |
| 2                    | 1   | 0.12               | 88.2      | 0.15               | 88.9      |
| 3                    | 3   | 0.02               | 92.0      | 0.02               | 92.6      |
| 4                    | 1   | 0.13               | 93.3      | 0.27               | 95.8      |

Homeindeksit pysyvät koko tarkasteluvuoden ajan matalina kaikissa tarkastelupisteissä eikä homeen kasvua rakenteessa tapahdu nyky- eikä tulevaisuuden ilmastossa. Kosteuden kondensoitumisen kannalta suhteellisen kosteuden arvot pysyvät riittävän alhaisina. Suhteellisen kosteuden maksimi-arvot ovat selvästi korkeampia kuin rakenteessa 5.1, koska tästä rakenteesta puuttuu ulkoverhouspelti. Toisaalta rakenteen puinen julkisivuverhous on itsessään jo niin tiivis, että viistosade ei aiheuta merkittävää haittaa rakenteen toimivuudelle. Rakenne US 6.1 on toimiva rakenneratkaisu.

### 8.1.7 Rakenne US 7, puuverhoiltu CLT-elementti

#### Alkuperäinen versio US 7.1

Rakenne US 7.1 on ehdotettu julkisivukorjausratkaisuksi joensuulaiseen Koy Kirkkokatu 18:a. Koy Kirkkokatu 18:a kuuluu kaksi vuonna 1971 rakennettua asuinkerrostaloa, jotka ovat korjaustarpeessa. Kohteessa korjauskustannukset on tarkoitettu

kattaa lisärakentamisen avulla. Kerrostalot ovat nelikerroksisia tiili-/betonirunkoisia rakennuksia ja niiden päälle on tarkoitus rakentaa lisäkerroksia tilaelementeillä. Julkisivut on suunniteltu korjattavan CLT-runkoisilla julkisivuelementeillä ja lisärakentaminen on tarkoitus toteuttaa CLT-runkoisilla tilaelementeillä. Tilaelementtien etuna on etenkin niiden keveys ja rakentamisen nopeus. Tilaelementin rakenneratkaisut ja mallintamisen tulokset on esitettyinä kappaleessa 8.1.8. Kuvassa 8.9 on esitetty rakenteen US 7.1 leikkauskuva ja materiaalikerrokset.



**Kuva 8.9** Rakenteen US 7.1 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna.

Laskenta suoritettiin Jokioisen ilmastoissa 2004 ja 2050 ja julkisivun tarkastelusuuntana käytettiin pohjoista. Tuuletusväliässä ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 100 l/h molemmissa ilmastoissa. Julkisivuelementit kerrostaloon on suunniteltu CLT-levyistä rakennettuina ja julkisivujen pintamateriaaliksi on valittu puuverhous. Tässä tapauksessa julkisivuverhoukseksi valittiin 28 mm paksu puinen vaakapaneeliverhous, esimerkiksi kuningaspaneeli. Materiaaleina julkisivuverhouksen, rungon, koolauksen ja CLT-levyn mallinnuksessa käytettiin kaikissa kuusta (ks. liite 1). Tuulensuojavilla mallinnettiin laskelmissa mineraalivillana, johon laitettiin erillinen tuulensuojapinta näennäisvastuksena (ks. liite 1).

Vanha seinärakenne poistetaan sisäkuoreen asti ja vanhaan sisäkuoreen kiinnitetään uusi CLT-elementti. Rakenne kiinnitetään kerrostalon vanhaan sisäkuoreen sopivilla betonikiinnikkeillä ja uudelle julkisivuelementille voidaan tehdä oma perustus vanhan seinän perustuksen viereen. CLT-rakenteinen nauhaelementti kiinnitetään kerrostalon kantavien seinien päätyihin ja pilareihin. CLT-levy on itsessään niin jäykkä, ettei elementtiin tarvita erillisiä jäykistevanereita tai -levyjä. CLT-julkisivuelementtiin ei myöskään mallinnettu erillistä ilman-/höyrynsulkukerrosta, koska CLT-levy on itsessään niin tiivis. Levyn tiiviyydestä huolimatta CLT-elementtien välisiin saumoihin tulee työmaalla asentaa esimerkiksi paisuvat saumanauhat saumojen tiiviyyden varmistamiseksi.

Taulukossa 8.9 on esitetty rakenteen US 7.1 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot tarkastelupisteissä nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa. Rakenteessa US 7.1 olosuhteet pysyvät homeen kasvulle epäsuotuisina kaikissa tarkastelupisteissä ja homeindeksin arvot pysyvät sallituissa rajoissa  $M < 1$ . Käytettäessä tuulensuojalevynä jäykkää tuulensuojavillaa on tuulensuojan lämmönvastus riittävä, jolloin rakenteen ulkopinnan lämpötila pysyy sopivana.

**Taulukko 8.9** Rakenteen US 7.1 homeindeksien maksimi-arvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

| Alkuperäinen rakenne |     | Jokioinen 2004     |           | Jokioinen 2050     |           |
|----------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Tarkastelupiste      | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] |
| 1                    | 1   | 0.00               | 80.5      | 0.02               | 83.1      |
| 2                    | 1   | 0.13               | 86.9      | 0.18               | 87.8      |
| 3                    | 3   | 0.01               | 92.4      | 0.01               | 92.7      |
| 4                    | 1   | 0.01               | 84.5      | 0.09               | 87.0      |

Taulukosta 8.9 voidaan huomata, että kosteuden tiivistymisen vaaraa rakenteessa ei ole, koska suurimmat suhteellisen kosteuden arvot pysyvät alle 97 % RH:n kaikissa tarkastelupisteissä. Rakenne US 7.1 on toimiva rakenneratkaisu.

### 8.1.8 Rakenne US 8, puuverhoiltu CLT-tilaelementti

#### Alkuperäinen versio US 8.1

Rakenne US 8.1 on Koy Kirkkokatu 18:a ehdotettu tilaelementtien rakenneratkaisu. Rakennuksen laajentaminen on suunniteltu tehtävän CLT-runkoisilla tilaelementeillä, jotka asennetaan kerrostalon katolle teräspalkistojen varaan. Teräspalkistojen avulla tilaelementtien aiheuttamat kuormat saadaan jaettua kerrostalon kantaville seinille, jolloin rasi- tusta ei näin ollen aiheudu liikaa rakennuksen kattolaatoille. Tilaelementtien rungot on suunniteltu tehtävän CLT-levyistä. Tässä tapauksessa julkisivuverhokseksi valittiin 28 mm paksuinen vaakapaneeliverhous. Materiaalina julkisivuverhoksen, koolausten, rungon ja CLT-levyn mallinnuksessa käytettiin kaikissa kuusta (ks. liite 1). Kuvassa 8.10 on esitetty CLT-runkoisen tilaelementin leikkauskuva sekä materiaalikerrokset.



**Kuva 8.10** Rakenteen US 8.1 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna.

Laskenta suoritettiin Jokioisen ilmastoissa 2004 ja 2050 ja julkisivun tarkastelusuuntana käytettiin pohjoista. Tuuletusvälissä ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 100 l/h molemmissa ilmastoissa. Taulukossa 8.10 on esitetty Rakenteen US 8.1 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot tarkastelupisteissä nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

**Taulukko 8.10** Rakenteen US 8.1 homeindeksien maksimi-arvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

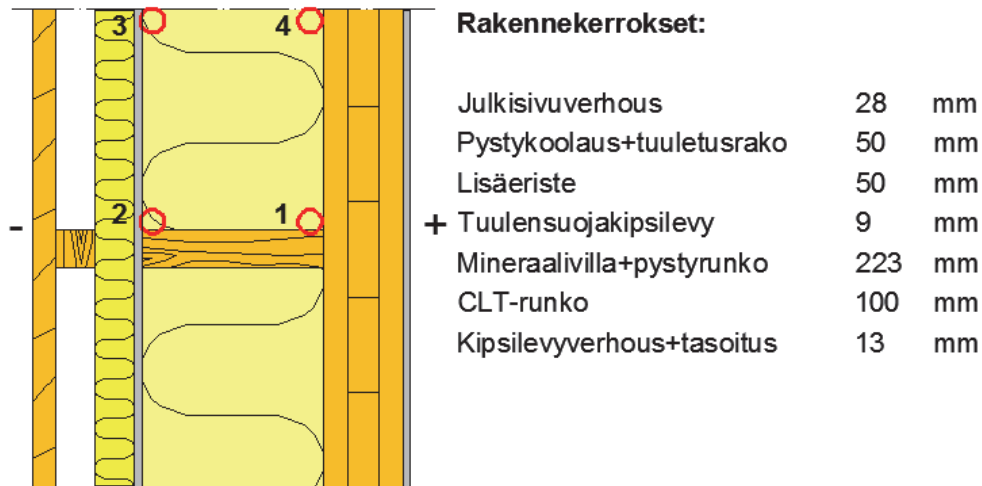
| Alkuperäinen rakenne |     | Jokioinen 2004     |           | Jokioinen 2050     |           |
|----------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Tarkastelupiste      | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] |
| 1                    | 1   | 0.00               | 79.0      | 0.01               | 82.0      |
| 2                    | 1   | 0.76               | 90.6      | 0.99               | 91.6      |
| 3                    | 2   | 0.71               | 97.0      | 1.05               | 97.0      |
| 4                    | 1   | 0.01               | 83.2      | 0.06               | 86.2      |

Rakenteen US 8.1 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot on esitetty taulukossa 8.10. Kuten taulukosta voidaan havaita, nousevat homeindeksien arvot korkeiksi tarkastelupisteissä 2 ja 3 molemmissa ilmastoissa ja tulevaisuuden ilmastossa tarkastelupisteessä 3 homeindeksi ylittää raja-arvon 1. Tulevaisuuden ilmastossa tarkastelupisteessä 3 myös suhteellisen kosteus nousee arvoon 97 % RH. Rakenne kannattaa myös tässä tilanteessa toteuttaa lisäämällä tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelle lisälämmöneriste tai asentamalla tuulensuojakipsilevyn tilalle tuulensuojavilla. Näiden rakenteiden laskentatulokset löytyvät seuraavasta kappaleesta rakenteen US 8.2 tuloksista. Rakenne US 8.1 ei ole toimiva rakenneratkaisu.

### Korjattu versio US 8.2

Tarkastelupisteen 4 korkean suhteellisen kosteuden vuoksi rakennetta US 8.1 korjattiin parantamalla tuulensuojalevyn lämmönvastusta. Tuulensuojaksi valittiin pelkän tuulensuojakipsilevyn sijaan tuulensuojakipsilevy ja 50 mm paksuinen mineraalivil-

lalisäeriste, vastaavasti kuten rakenteessa US 1.2. Kuvassa 8.11 on esitetty rakenteen US 8.2 rakenneleikkaus, materiaalikerrokset ja tarkastelupisteet.



**Kuva 8.11** Rakenteen US 8.2 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna

Laskenta suoritettiin Jokioisen ilmastoissa 2004 ja 2050 ja julkisivun tarkastelusuunnatana käytettiin pohjoista. Taulukossa 8.11 on esitetty rakenteen US 8.2 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot eri tarkastelupisteissä nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

**Taulukko 8.11** Rakenteen US 8.2 homeindeksien maksimi-arvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

| Korjattu rakenne |     | Jokioinen 2004     |           | Jokioinen 2050     |           |
|------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Tarkastelupiste  | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] |
| 1                | 1   | 0.00               | 76.1      | 0.00               | 79.8      |
| 2                | 1   | 0.10               | 84.0      | 0.15               | 85.2      |
| 3                | 2   | 0.12               | 88.5      | 0.14               | 89.4      |
| 4                | 1   | 0.00               | 80.1      | 0.03               | 83.8      |

Taulukosta voidaan havaita, että homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien arvot eivät nouse korjatun version tarkastelupisteissä missään kohdassa raja-arvojen yläpuolelle. Rakenteessa US 8.2 suhteellisen kosteuden maksimi-arvot ovat kaikissa tarkastelupisteissä matalammat kuin rakenteessa US 8.1. Myös homeindeksit ovat kaikissa tarkastelupisteissä matalammat. Rakenne US 8.2 on toimiva rakenneratkaisu.

### Korjattu versio US 8.3

Rakennetta kokeiltiin korjata myös vaihtamalla tuulensuojakipsilevyn tilalle jäykkä 30 mm tuulensuojavilla, vastaavasti kuin rakenteessa US 1.3. Mallinnuksessa tuulensuojavillan päälle asennettiin tuulensuojapinnaksi näennäisvastus. Tuulensuojavillan ja näennäisvastuksen materiaaliominaisuudet löytyvät liitteestä 1. Kaikki puumateri-

aalit on myös rakenteessa US 8.3 mallinnettu kuusena (ks. liite 1). Kuvassa 8.12 on esitetty rakenteen US 8.3 rakenneleikkaus, materiaalikerrokset ja tarkastelupisteet.



**Kuva 8.12** Rakenteen US 8.2 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna

Laskenta suoritettiin Jokioisen ilmastoissa 2004 ja 2050 ja julkisivun tarkastelusuuntana käytettiin pohjoista. Tuuletusvälissä ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 100 l/h molemmissa ilmastoissa. Taulukossa 8.12 on esitetty rakenteen US 8.3 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot eri tarkastelupisteissä nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

**Taulukko 8.12** Rakenteen US 8.3 homeindeksien maksimi-arvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

| Korjattu rakenne |     | Jokioinen 2004     |           | Jokioinen 2050     |           |
|------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Tarkastelupiste  | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] |
| 1                | 1   | 0.00               | 75.5      | 0.00               | 78.8      |
| 2                | 1   | 0.02               | 83.3      | 0.08               | 84.2      |
| 3                | 3   | 0.00               | 96.6      | 0.01               | 96.5      |
| 4                | 1   | 0.00               | 79.4      | 0.01               | 82.7      |

Taulukosta voidaan havaita, että homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien arvot eivät nouse myöskään rakenteen US 8.3 tarkastelupisteissä missään kohdassa raja-arvojen yläpuolelle. Rakenne US 8.3 on toimiva rakenneratkaisu.

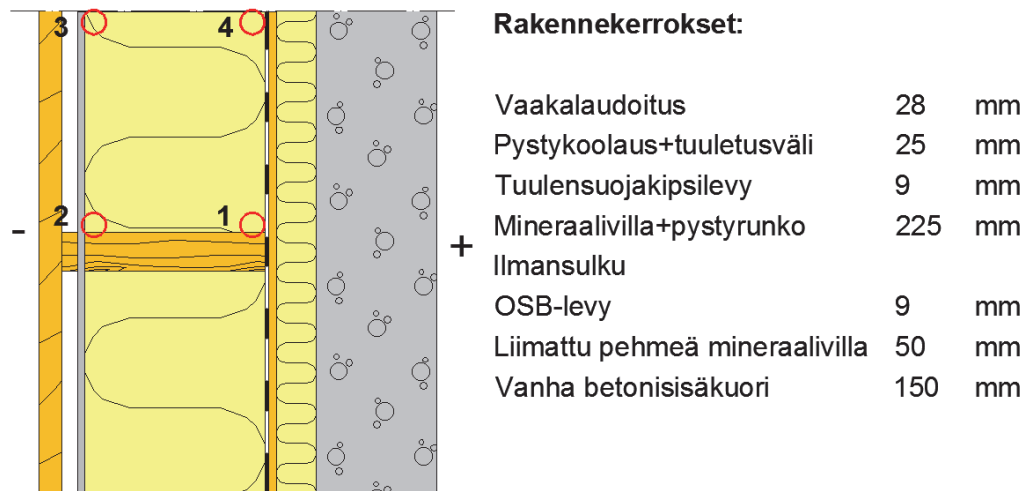
### 8.1.9 Rakenne US 9, puuverhoiltu TES-elementti

#### Alkuperäinen versio US 9.1

Rakenne US 9.1 on suunniteltu julkisivukorjausta varten betonisandwich-elementeistä rakennettuun asuinkerrostaloon. Rakennusta on suunniteltu laajennettavan korjauksen yhteydessä. Julkisivuelementit kerrostaloon on suunniteltu TES-



elementeistä rakennettuina ja julkisivujen pintamateriaaliksi on valittu vaakalaudoitus. Kuvassa 8.13 on esitetty kerrostaloon suunnitellun uuden julkisivuelementin alkuperäinen rakenneleikkaus sekä materiaalikerrokset.



**Kuva 8.13** Rakenteen US 9.1 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna

Laskenta suoritettiin Jokioisen ilmastoissa 2004 ja 2050 ja julkisivun tarkastelusuuntana käytettiin pohjoista. Tuuletusvälissä ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 100 l/h molemmissa ilmastoissa. Muista tarkastelluista rakenteista poiketen rakenteessa US 9.1 tuuletusraon koko alkuperäisessä ratkaisussa oli vain 25 mm:ä. RIL 107–2012 (2012) mukaan puurunkoisissa puuverhoilluissa seinärakenteissa tuuletusvälin minimipaksuus on 20 mm:ä, joten rakenteen tuuletusväli täyttää tässä mielessä vaatimukset. Taulukossa 8.13 on esitetty rakenteen US 9.1 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot eri tarkastelupisteissä nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

**Taulukko 8.13** Rakenteen US 9.1 homeindeksien maksimi-arvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

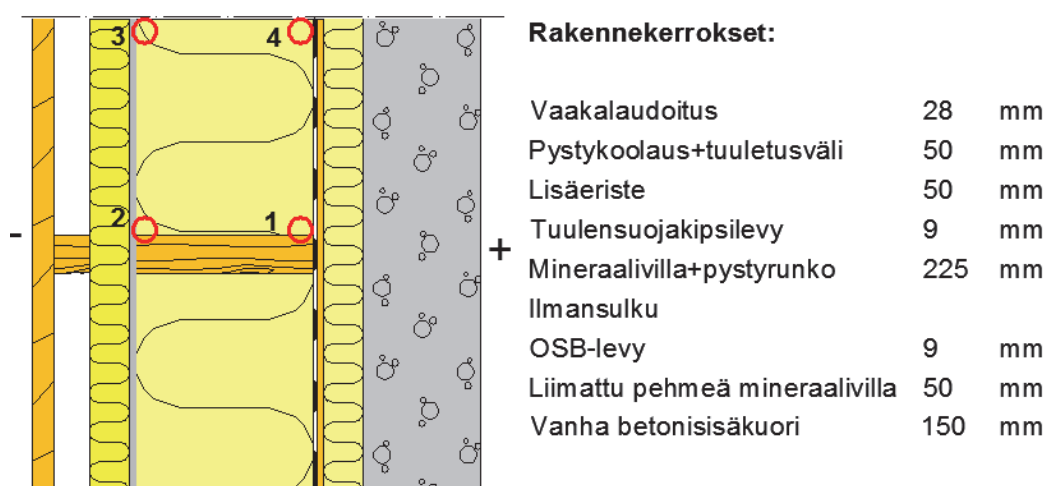
| Alkuperäinen rakenne |     | Jokioinen 2004     |           | Jokioinen 2050     |           |
|----------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Tarkastelupiste      | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] |
| 1                    | 1   | 0.03               | 86.1      | 0.11               | 88.2      |
| 2                    | 1   | 2.81               | 93.2      | 3.25               | 93.7      |
| 3                    | 2   | 1.17               | 97.1      | 1.43               | 97.2      |
| 4                    | 1   | 0.16               | 93.0      | 0.34               | 95.5      |

Kuten taulukosta havaitaan, ylittyvät homeindeksien arvot tarkastelupisteissä 2 ja 3 sekä nyky- että tulevaisuuden ilmastoissa. Rakenne ei ole siis toimiva nyky- eikä tulevaisuuden ilmastossa. Homeindeksien korkeiden arvojen lisäksi myös suhteellisen kosteuden maksimi-arvot ovat raja-arvon 97 % RH yläpuolella tarkastelupisteessä 3. Korkeat homeindeksien arvot johtuvat tässä rakenteessa osaksi siitä, että kapeam-

massa tuuletusvälissä samalla ilmanvaihtuvuudella ilman virtausmäärä on pienempi, jolloin homeindeksin arvot pyrkivät nousemaan. Myös tuulensuojan huono lämmöneristävyys on osasy syy korkeisiin homeindeksien arvoihin. Kappaleessa 8.2.1 on tehty lisälaskelmia ilmanvaihtuvuuden vaikutuksesta homeindeksiin. Rakenne US 9.1 ei ole toimiva rakenneratkaisu.

### Korjattu versio US 9.2

Rakennetta korjattiin lisäämällä rakenteeseen 50 mm paksuinen lisäeristekerros tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelle (2. kipsilevy ks. liite 1) ja rakenteen tuuletusraon kokoa kasvatettiin 50 mm:iin. Lisäeriste mallinnettiin laskuissa mineraalivillana (ks. liite 1). Kuvassa 8.14 on esitetty rakenteen US 9.1 korjatun version US 9.2:n rakenneleikkaus ja materiaalikerrokset.



**Kuva 8.14** Rakenteen US 9.2 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna

Rakenne US 9.2 mallinnettiin myös Jokioisen ilmastoissa 2004 sekä 2050. Tuuletusvälissä ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 100 l/h molemmissa ilmastoissa. Lisäämällä mineraalivillaa tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelle rakenteen ulko-osan lämmönvastus nousee ja lämpötila rungon ulkopinnassa kasvaa. Taulukossa 8.14 on esitetty rakenteen US 9.2 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot tarkastelupisteissä nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa. Taulukosta voidaan havaita, että homeindeksien arvot eivät nouse korjatun version tarkastelupisteissä missään kohdassa raja-arvojen yläpuolelle.

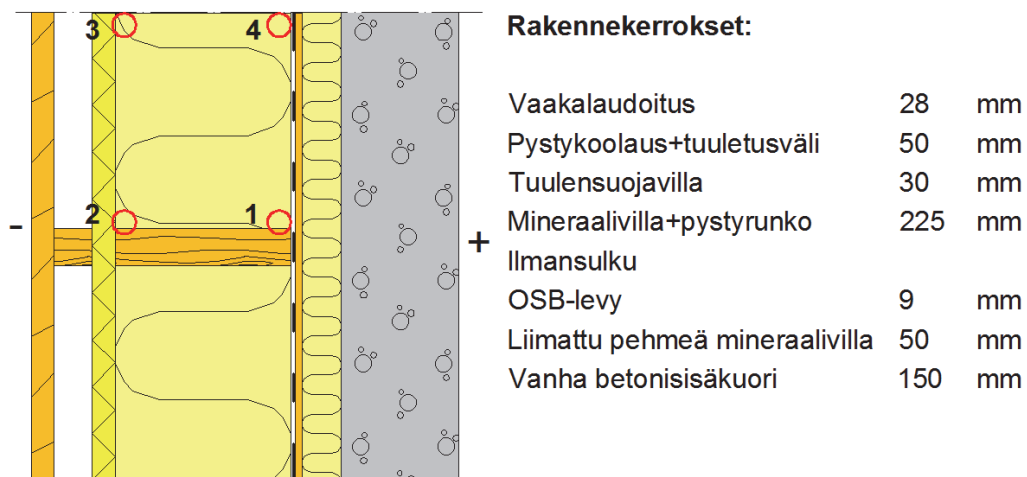
**Taulukko 8.14** Rakenteen US 9.2 homeindeksien maksimiarvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimiarvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

| Korjattu rakenne |     | Jokioinen 2004  |        | Jokioinen 2050  |        |
|------------------|-----|-----------------|--------|-----------------|--------|
| Tarkastelupiste  | HHL | Homeindeksi [-] | RH [%] | Homeindeksi [-] | RH [%] |
| 1                | 1   | 0.01            | 83.7   | 0.07            | 86.4   |
| 2                | 1   | 0.17            | 86.5   | 0.22            | 87.2   |
| 3                | 2   | 0.20            | 91.3   | 0.23            | 92.0   |
| 4                | 1   | 0.10            | 91.7   | 0.26            | 93.9   |

Tuuletusraon koon kasvattaminen ja lisäeristeen lisääminen tuulensuojalevyn ulkopuolelle saivat aikaan sen, että homeindeksien arvot putosivat kaikissa pisteissä alle raja-arvon. Myös suhteellisen kosteuden arvot laskivat reilusti raja-arvon 97 % RH alapuolelle. Rakenne US 9.2 on toimiva rakenneratkaisu.

### Korjattu versio US 9.3

Rakennetta kokeiltiin korjata myös asettamalla tuulensuojakipsilevyn tilalle jäykkä 35 mm tuulensuojavilla ja kasvattamalla tuuletusraon paksuutta 25 mm:stä 50 mm:iin. Jäykällä tuulensuojavillalla voidaan korvata tuulensuojakipsilevy suoraan eikä muita muutoksia rakenteisiin tarvitse tehdä. Mallinnuksessa tuulensuojavillan päälle asennettiin tuulensuojapinnaksi näennäisvastus ja näennäisvastuksen alla oleva tuulensuojavilla mallinnettiin mineraalivillana (ks. liite 1). Myös rakenne US 9.3 mallinnettiin Jokioisen ilmastoissa 2004 sekä 2050. Tuuletusväliä ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 100 l/h molemmissa ilmastoissa. Kuvassa 8.15 on esitetty rakenteen US 9.3 rakenneleikkaus, materiaalikerrokset ja tarkastelupisteet.



**Kuva 8.15** Rakenteen US 9.3 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna

Taulukossa 8.15 on esitetty rakenteen US 9.3 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot tarkastelupisteissä sekä nyky- että tulevaisuuden ilmastossa. Taulukosta voidaan havaita, että homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien arvot

eivät nouse korjatun version rakenteen US 9.3 tarkastelupisteissä missään kohdassa raja-arvojen yläpuolelle.

**Taulukko 8.15** Rakenteen US 9.3 homeindeksien maksimiarvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimiarvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

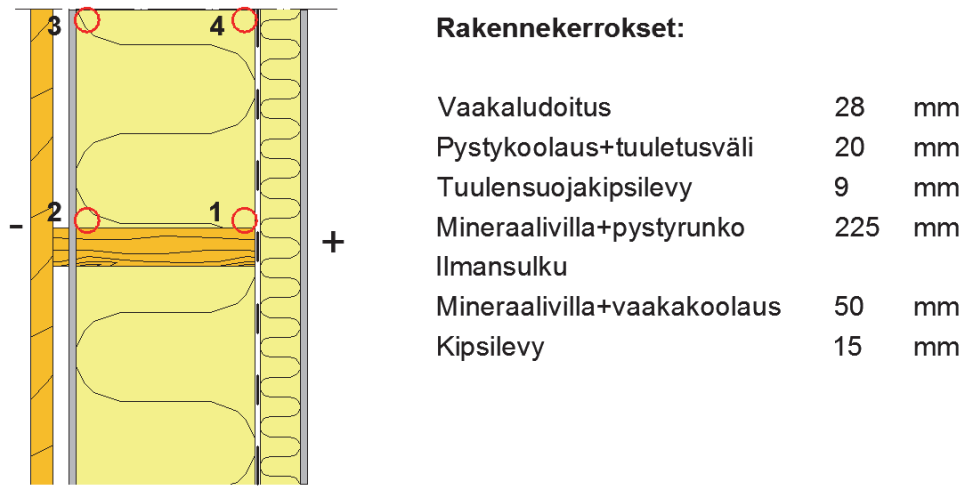
| Korjattu rakenne |     | Jokioinen 2004     |           | Jokioinen 2050     |           |
|------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Tarkastelupiste  | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] |
| 1                | 1   | 0.01               | 84.8      | 0.09               | 87.1      |
| 2                | 1   | 0.24               | 88.9      | 0.38               | 89.6      |
| 3                | 3   | 0.03               | 93.2      | 0.03               | 93.6      |
| 4                | 1   | 0.13               | 92.7      | 0.30               | 94.7      |

Vaikka rakenne US 9.2 on myös toimiva rakenne, toimii versio US 9.3 vielä paremmin. Rakenteessa US 9.3 homeindeksit laskevat sekä nyky- että tulevaisuuden ilmastossa pienemmiksi ja myös tarkastelupisteessä 4 ollut hieman korkea suhteellisen kosteuden huippuarvo laskee tässä versiossa reilusti alle raja-arvon 97 % RH. Rakenne US 9.3 on toimiva rakenneratkaisu.

#### 8.1.10 Rakenne US 10, puuverhoiltu TES-tilaelementti

##### Alkuperäinen versio 10.1

Rakenne US 10.1 on Kerrostalon korjauskurssilla suunniteltu rakennemalli. Seinärakenne on suunniteltu betonisandwichelementeistä rakennetun asuinkerrostalon laajentamiseen. Rakennusta on suunniteltu laajennettavan korjauksen yhteydessä tilaelementeillä ja tilaelementit kerrostaloon on suunniteltu TES-elementeistä. Rakenne US 10.1 on suunniteltu samaan kerrostaloon kuin rakenne US 9.1. Julkisivujen pintamateriaaliksi on valittu vaakalaudoitus julkisivuelementeissä ja tilaelementeissä. Rakenteen US 10.1 TES-tilaelementin rakenne on pitkälti samanlainen rakenteen US 9.1 TES-julkisivuelementin kanssa. Kuvassa 8.16 on esitetty rakenteen US 10.1 rakenneleikkaus, materiaalikerrokset ja tarkastelupisteet.



**Kuva 8.16** Rakenteen US 10.1 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna

Laskenta suoritettiin Jokioisen ilmastoissa 2004 ja 2050 ja julkisivun tarkastelusuunnana käytettiin pohjoista. Tuuletusvälissä ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 100 l/h molemmissa ilmastoissa. Tuuletusväli paksuus on tässä rakenteessa vain 20 mm:ä. Tilaelementti poikkeaa vastaavasta julkisivuelementistä lähinnä siinä, että rakenteen mallintamisessa ei ole mukana kerrostalon vanhaa paksua betonisisäkuorta. Myös rakenteen sisäpuolella oleva villa on asennettu koolausten väliin, kun julkisivuelementissä villa on liimattu vanhaan rakennuksen runkoon. Tässä tapauksessa julkisivuverhoukseksi valittiin vastaava 28 mm paksu puinen vaakapaneeliverhous kuin saman rakennuksen julkisivuelementissä rakenteessa US 9.1. Materiaalina julkisivuverhouksen, koolausten ja rungon mallinnuksessa käytettiin kaikissa kuusta (ks. liite 1). Taulukossa 8.16 on esitetty Rakenteen US 10.1 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot tarkastelupisteissä nyky- ja tulevaisuuden ilmastoissa.

**Taulukko 8.16** Rakenteen US 10.1 homeindeksien maksimi-arvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

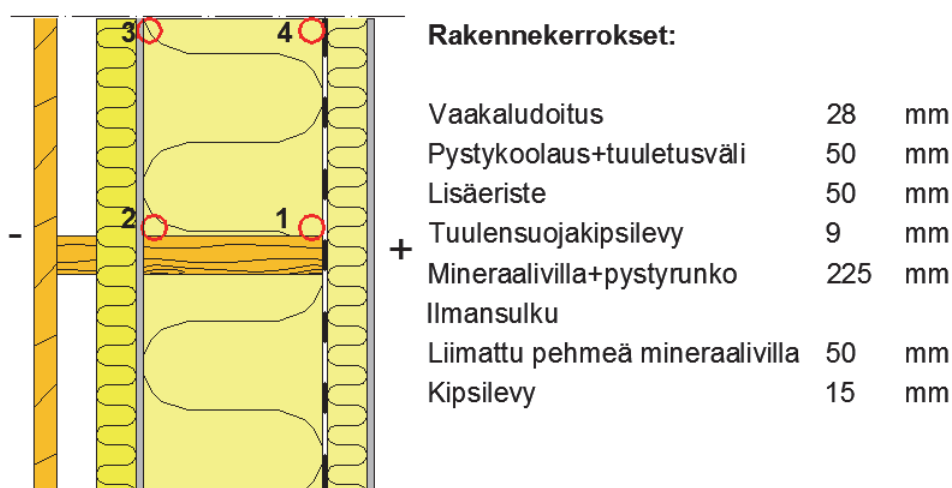
| Alkuperäinen rakenne |     | Jokioinen 2004     |           | Jokioinen 2050     |           |
|----------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Tarkastelupiste      | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] |
| 1                    | 1   | 0.15               | 89.4      | 0.26               | 91.1      |
| 2                    | 1   | 4.45               | 97.0      | 4.75               | 97.7      |
| 3                    | 2   | 1.61               | 97.0      | 1.86               | 97.0      |
| 4                    | 1   | 0.51               | 97.0      | 0.95               | 97.1      |

Rakenteessa US 10.1 suhteellisen kosteuden arvot pysyvät korkeina rakenteen ulko-osissa, missä myös homeindeksin arvot nousevat yli sallitun rajan  $M < 1$ . Myös rakenteen sisäreunassa tarkastelupisteessä 4 on suhteellinen kosteus yli yläraja-arvon 97 % RH tulevaisuuden ilmastossa. Yhdessä korkean suhteellisen kosteuden kanssa tuulensuojalevyn ja rungon ulko-osan rajapintaan syntyy näin ollen otolliset olosuht-

teet homeen kasvuille. Korkeat homeindeksien arvot johtuvat tässäkin rakenteessa osaksi siitä, että kapeammassa tuuletusvälissä samalla ilmanvaihtuvuudella ilman virtausmäärä on pienempi, jolloin homeindeksien arvot pyrkivät nousemaan. Rakenne US 10.1 ei ole toimiva rakenneratkaisu.

### Korjattu versio 10.2

Rakennetta korjattiin lisäämällä rakenteeseen 50 mm paksuinen lisäeristekerros tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelle. Lisäeriste mallinnettiin laskuissa mineraalivillana (ks. liite 1). Myös rakenteen tuuletusväliä kasvatettiin 50 mm:iin, koska laskentatarkasteluissa havaittiin, että pelkkä lisäeristeen lisääminen tai tuuletusvälin koon kasvattaminen ei parantanut rakenteen toimintaa riittävästi. Kuvassa 8.17 on esitetty rakenteen US 10.1 korjatun version US 10.2:n rakenneleikkaus ja materiaalikerrokset.



**Kuva 8.17** Rakenteen US 10.2 rakenneleikkaus ylhäältä kuvattuna

Laskenta suoritettiin Jokioisen ilmastoissa 2004 ja 2050 ja julkisivun tarkastelusuuntana käytettiin pohjoista. Tuuletusvälissä ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 100 l/h molemmissa ilmastoissa. Taulukossa 8.17 on esitetty rakenteen US 10.2 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien suurimmat arvot tarkastelupisteissä sekä nyky- että tulevaisuuden ilmastossa.

**Taulukko 8.17** Rakenteen US 10.2 homeindeksien maksimi-arvot  $M_{max}$  sekä suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{max}$  nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

| Korjattu rakenne |     | Jokioinen 2004     |           | Jokioinen 2050     |           |
|------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Tarkastelupiste  | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] |
| 1                | 1   | 0.01               | 83.7      | 0.09               | 86.5      |
| 2                | 1   | 0.17               | 86.5      | 0.22               | 87.3      |
| 3                | 2   | 0.21               | 91.7      | 0.24               | 92.2      |
| 4                | 1   | 0.13               | 91.4      | 0.31               | 94.3      |

Taulukosta voidaan havaita, että homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien arvot eivät nouse korjatun version tarkastelupisteissä missään kohdassa raja-arvojen yläpuolelle. Lisäämällä mineraalivillaa tuulensuojakipsilevyn päälle rakenteen ulko-osan lämmönvastus nousee ja lämpötila rungon ulkopinnassa kasvaa. Lämpötilan kasvu laskee ilman suhteellista kosteutta rungon ulkopinnassa, jolloin olosuhteet homeen kasvuun muuttuvat epäsuotuisiksi. Rakenne US 10.2 on toimiva rakennerratkaisu.

## 8.2 Tuuletusvälien ilmanvaihtuvuuksien vertailu

Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden arvon vaikutusta rakenteen toimintaan kokeiltiin puuverhoillulla julkisivuelementillä US 1.2. Tämän tarkastelun tulokset ja vertailut alkuperäisiin versioihin on esitetty seuraavassa kappaleessa.

### 8.2.1 Puuverhoiltu julkisivuelementtirakenne US 1.2

Kuten aiemmin mainittiin, käytettiin puuverhoiltujen rakenteiden laskennassa tuuletusvälin ilmanvaihtuvuutena 100 1/h ja tiiliverhoiluilla 10 1/h. Laskentatarkastelujen yhteydessä tarkistettiin kuitenkin kahden rakenteen toimivuus myös muilla tuuletusvälin ilmanvaihdolla nykyilmastossa. Puuverhoillun rakenteen US 1.2 (ks. kuva 8.2) toimivuutta kokeiltiin ilmanvaihdolla 10 1/h, 40 1/h, 50 1/h, 75 1/h sekä 200 1/h. Nämä ilmanvaihtuvuudet vastaavat 50 mm tuuletusraolla ja 3 metrin seinäkorkeudella karkeasti seuraavia ilman virtausnopeuksia:

- Ilmanvaihtuvuus: 10 1/h, Virtausnopeus noin: 0,01 m/s
- Ilmanvaihtuvuus: 40 1/h, Virtausnopeus noin: 0,03 m/s
- Ilmanvaihtuvuus: 50 1/h, Virtausnopeus noin: 0,04 m/s
- Ilmanvaihtuvuus: 75 1/h, Virtausnopeus noin: 0,06 m/s
- Ilmanvaihtuvuus: 100 1/h, Virtausnopeus noin: 0,08 m/s
- Ilmanvaihtuvuus: 200 1/h, Virtausnopeus noin: 0,16 m/s

Näistä ilmanvaihtuvuudella 10 1/h ilman virtausnopeus on aiemmissa kenttätutkimuksissa (Vinha 2007) saatujen tuuletusrakojen ilman virtausnopeuksien (0,02-0,20 m/s) mittaustulosten alapuolella, mutta muut virtausnopeudet täsmäävät kenttämittaustuloksiin. Laskentatarkastelut tehtiin rakenteella US 1.2 Jokioisen vuoden 2004 ilmastossa. Taulukossa 8.18 on esitetty rakenteen US 1.2 homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien maksimi-arvot tarkastelupisteissä nykyilmastossa tuuletusvälin eri ilmanvaihtuvuuksilla. Perusvaihtoehtona käytetyn ilmanvaihtokertoimen 100 1/h mukaiset arvot on esitetty taulukossa sinisellä fontilla.

**Taulukko 8.18** Rakenteen US 1.2 homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-  
miarvot tuuletusvälin eri ilmanvaihtuvuuksilla.

| Rakenne US 1.2  |     | Jokioinen 2004     |           |                     |           |                     |           |
|-----------------|-----|--------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|
|                 |     | Ilmanvaihto 10 1/h |           | Ilmanvaihto 40 1/h  |           | Ilmanvaihto 50 1/h  |           |
| Tarkastelupiste | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-]  | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-]  | RH<br>[%] |
| 1               | 1   | 0.00               | 81.2      | 0.00                | 77.7      | 0.00                | 77.1      |
| 2               | 1   | 2.10               | 89.5      | 0.93                | 87.6      | 0.77                | 87.0      |
| 3               | 2   | 1.47               | 89.9      | 0.99                | 93.9      | 0.81                | 93.3      |
| 4               | 1   | 0.06               | 78.6      | 0.00                | 81.4      | 0.00                | 80.7      |
|                 |     | Ilmanvaihto 75 1/h |           | Ilmanvaihto 100 1/h |           | Ilmanvaihto 200 1/h |           |
| Tarkastelupiste | HHL | Homeindeksi<br>[-] | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-]  | RH<br>[%] | Homeindeksi<br>[-]  | RH<br>[%] |
| 1               | 1   | 0.00               | 75.9      | 0.00                | 75.0      | 0.00                | 72.3      |
| 2               | 1   | 0.43               | 86.0      | 0.23                | 85.1      | 0.04                | 82.2      |
| 3               | 2   | 0.49               | 91.5      | 0.28                | 90.3      | 0.07                | 86.2      |
| 4               | 1   | 0.00               | 79.3      | 0.00                | 78.2      | 0.00                | 74.9      |

Kuten taulukosta 8.18 huomataan, ei rakenne ole toimiva tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden arvolla 10 vaihtoa tunnissa. Pienellä ilmanvaihdolla rakenteen lämpötila on suurempi kuin suurella ilmanvaihdolla ja huippuarvot ovat rakenteen ulko-osissa yli 3 °C suuremmat. Suhteellinen kosteus on kaikissa pisteissä huomattavasti korkeampi pienemmällä ilmanvaihdolla varustetulla rakenteella ja rakenteen kuivuminen on hitaampaa, koska pieni ilmanvaihtuvuus ei pysty poistamaan rakenteeseen tulevaa kosteutta riittävän tehokkaasti.

Myös tuuletusraon ilmanvaihtuvuudella 40 1/h rakenne US 1.2 toimii huonommin kuin alkuperäinen rakenne ja rakenteen tarkastelupisteessä 3 homeindeksi nousee melkein asetettuun  $M < 1,0$  raja-arvoon. Lämpötilat ovat tarkasteluvuotena melko lähellä alkuperäisen rakenteen arvoja, ollen kuitenkin hieman korkeampia. Siirryttäessä 40 1/h ilmanvaihtuvuudesta 50 1/h ilmanvaihtuvuuteen muutoksia tapahtuu ja homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien maksimi-  
miarvot pienenevät ja rakenteen toiminta paranee edelleen.

Testattu rakenne US 1.2 75 1/h ilmanvaihtuvuudella toimii edelleen hieman huonommin kuin 100 1/h ilmanvaihtuvuudella. Rakenteen sisäosan (tarkastelupisteet 1 ja 4) olosuhteet ovat tässä laskennassa jo lähes vastaavat kuin alkuperäisessä rakennemallissa, mutta ulko-osissa on vielä hieman poikkeavuuksia. Lämpötilat ovat kaikissa tarkastelupisteissä vastaavat kuin alkuperäisessä, mutta tarkastelupisteissä 2 ja 3 suhteellisen kosteuden arvot ovat pienemmästä ilmanvaihtuvuudesta johtuen hieman korkeammat syksyllä. Laskennasta saadut suhteellisten kosteuksien ja lämpötilojen kuvaajat ajan suhteen noudattavat näillä rakenteilla jo lähes samaa linjaa ja erot ho-



meindekseissä ja suhteellisen kosteuden arvoissa muodostuvat yksittäisten huippuarvojen erojen vuoksi. Rakenteen toimivuutta kokeiltiin myös ilmanvaihtuvuudella 200 l/h. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuudella 200 l/h homeindeksien arvot pienenevät kaikissa pisteissä lähelle nollaa ja rakenteen toiminta parani edelleen verrattuna rakenteeseen, jossa ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 100 l/h. Ilmanvaihtuvuus 200 l/h on kuitenkin melko suuri ilmanvaihtuvuuden arvo puuverhotuilla seinillä, joten sitä ei käytetty tässä tutkimuksessa muissa laskentatarkasteluissa.

Laskennan tulosten mukaan tuuletusraon ilmanvaihtuvuus 10 l/h on liian pieni kyseiselle rakenteelle ja homeindeksin arvo nousee liian korkeaksi. Myös 40 l/h ilmanvaihtuvuudella rakenteessa on riski homeen kasvulle. Kuten laskentatuloksista voidaan kuitenkin päätellä, toimii kyseinen rakenne nykyilmastossa hyvin ilmanvaihtuvuuksilla 50–200 l/h, jotka vastaavat yhden kerroksen seinäkorkeudella 50 mm tuuletusraon ilman virtausnopeuksia 0,04–0,16 m/s.

### 8.3 Tuulensuojan lämmönvastusten vertailu

Rakenteesta US 1 tehtiin laskentatarkasteluja myös muilla tuulensuojavaihtoehtoilla, jotta saatiin kokeiltua, millä tuulensuojan lämmönvastuksilla kyseinen rakenne on vielä toimiva nyky- ja tulevaisuuden ilmastoissa. Rakenteissa US 1.1–1.3 käytettyjen tuulensuojaratkaisujen lisäksi tarkasteluissa kokeiltiin myös 12 mm ja 25 mm paksu- ja huokoisia puukuitulevyjä (esim. Tuulileijona ja Runkoleijona) sekä ratkaisua, jossa tuulensuojakipsilevyn päälle laitettiin 30 mm paksu lisäeriste. Erilaisten tuulensuojaratkaisujen lämmönvastukset olivat seuraavat:

- Tuulensuojakipsilevy 9 mm:  $R = 0,045 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$
- Huokoinen puukuitulevy 12 mm:  $R = 0,231 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$
- Huokoinen puukuitulevy 25 mm:  $R = 0,481 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$
- Tuulensuojakipsilevy 9 mm + ulkopuolella 30 mm lisäeriste:  $R = 0,795 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$
- Tuulensuojavilla 30 mm:  $R = 0,968 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$
- Tuulensuojakipsilevy 9 mm + ulkopuolella 50 mm lisäeriste:  $R = 1,295 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$

Taulukossa 8.19 on esitetty rakenteesta US 1 tehtyjen testilaskentojen tulokset erilaisilla tuulensuojavaihtoehtoilla. Tarkastelut tehtiin ilmanvaihtuvuudella 100 l/h ja tarkastelujen ilmansuuntana oli pohjoinen. Tarkastelut tehtiin sekä nyky- että tulevaisuuden ilmastoissa.

**Taulukko 8.19** Erilaisten tuulensuojavaihtoehtojen homeindeksien (M) ja suhteellisten kosteuksien (RH) maksimiarvot rakenteessa US 1 nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa.

|                  |     | Alkuperäinen rakenne                                  |        |                |        | 12 mm tuulensuojalevy  |        |                |        | 25 mm tuulensuojalevy                                 |        |                |        |
|------------------|-----|---|--------|----------------|--------|------------------------|--------|----------------|--------|---|--------|----------------|--------|
|                  |     | Jokioinen 2004  |        | Jokioinen 2050 |        | Jokioinen 2004         |        | Jokioinen 2050 |        | Jokioinen 2004  |        | Jokioinen 2050 |        |
| Tarkastelu-piste | HHL | M [-]   | RH [%] | M [-]          | RH [%] | M [-]                  | RH [%] | M [-]          | RH [%] | M [-]   | RH [%] | M [-]          | RH [%] |
| 1                | 1   | 0.00  | 76.9   | 0.00           | 79.5   | 0.00                   | 76.4   | 0.00           | 79.0   | 0.00  | 73.5   | 0.00           | 76.3   |
| 2                | 1   | 1.41  | 91.3   | 1.93           | 92.3   | 0.60                   | 87.3   | 0.70           | 88.8   | 0.17  | 83.0   | 0.36           | 85.1   |
| 3                | 2   | 0.93  | 96.8   | 1.15           | 97.0   | 0.50                   | 96.8   | 0.63           | 97.0   | 0.30  | 93.9   | 0.35           | 95.0   |
| 4                | 1   | 0.00  | 80.0   | 0.02           | 83.1   | 0.00                   | 79.6   | 0.01           | 82.7   | 0.00  | 76.6   | 0.00           | 79.7   |
|                  |     | Tuulensuojakipsilevy ja ulkopuolinen 30 mm lisäeriste |        |                |        | 30 mm tuulensuojavilla |        |                |        | Tuulensuojakipsilevy ja ulkopuolinen 50 mm lisäeriste |        |                |        |
|                  |     | Jokioinen 2004  |        | Jokioinen 2050 |        | Jokioinen 2004         |        | Jokioinen 2050 |        | Jokioinen 2004  |        | Jokioinen 2050 |        |
| Tarkastelu-piste | HHL | M [-]   | RH [%] | M [-]          | RH [%] | M [-]                  | RH [%] | M [-]          | RH [%] | M [-]   | RH [%] | M [-]          | RH [%] |
| 1                | 1   | 0.00  | 75.7   | 0.00           | 78.4   | 0.00                   | 74.1   | 0.00           | 76.7   | 0.00  | 75.0   | 0.00           | 77.7   |
| 2                | 1   | 0.48  | 86.3   | 0.64           | 86.8   | 0.14                   | 84.1   | 0.31           | 84.7   | 0.23  | 85.1   | 0.33           | 85.9   |
| 3                | 2   | 0.49  | 91.8   | 0.57           | 92.1   | 0.01                   | 96.3   | 0.01           | 96.3   | 0.28  | 90.3   | 0.37           | 90.5   |
| 4                | 1   | 0.00  | 78.9   | 0.01           | 82.0   | 0.00                   | 77.3   | 0.00           | 80.0   | 0.00  | 78.2   | 0.00           | 81.3   |

Kuten rakenteen US 1.1 kohdalla jo todettiin, tuulensuojakipsilevyn lämmönvastus  $0,045 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$  ei ole riittävä kyseisen seinärakenteen tuulensuojan lämmönvastukseksi. Sen sijaan kaikilla muilla kokeilla tuulensuojavaihtoehtojen rakenteen US 1 oli toimiva. Kokeiltaessa 12 mm paksuista huokoista puukuitulevyä tuulensuojana rakenteen homeindeksit pysyivät kaikissa tarkastelupisteissä sallituissa rajoissa, mutta tulevaisuuden ilmastossa tarkastelupisteessä 3 suhteellisen kosteuden maksimiarvo nousi hetkellisesti arvoon 97 % RH. Muilla tuulensuojavaihtoehtojen rakenteilla sekä homeindeksit että suhteelliset kosteudet pysyivät sallituissa rajoissa. Parhaiten toimiva tuulensuojaratkaisu testirakenteessa US 1 oli tuulensuojakipsilevy sekä sen ulkopuolelle laitettu 50 mm paksuinen lisäeriste (ks. Rakenne US 1.2). Toiseksi parhaiten toimiva ratkaisu oli 30 mm paksulla tuulensuojavilla varustettu rakenne. (ks. Rakenne US 1.3).

## 8.4 Rakenteen tiiviys

Vanha betonisisäkuori tai tiiliverhous ei ole riittävän ilmatiivis rakenteen hyvän kosteusteknisen toiminnan takaamiseksi, joten vanha sisäkuori tulee tiivistää tarkasti korjauksen yhteydessä. Julkisivuelementeissä ilman-/höyrynsulun vesihöyrynläpäisevyys tulee suunnitella vanhan rakenteen ominaisuuksien mukaan. Vanhan rakenteen diffuusiotiiviuden ollessa hyvä, kuten esimerkiksi vanhalla betonikuorella,

rakenteeseen voidaan asentaa pelkkä vesihöyryä läpäisevä ilmansulkukerros. Jos vanha rakenne ei ole diffuusiotiivis, voidaan rakenteeseen asentaa höyrynsulku, jonka tarpeellisuus ja diffuusiovastus pitää tarkistaa tapauskohtaisesti. Rakenteen ilmatiiviydessä ja diffuusiotiiviydessä tulee ottaa huomioon mahdolliset vanhan sisäkuoren halkeamat, elementtien saumat, ikkunoiden ja ovien liitokset sekä erilaisten läpivientien aukot tiiviyttä heikentävänä tekijänä ja nämä kohdat tulee tiivistää tarkasti esimerkiksi joustavalla tiivistysmassalla tai -vaahdolla ja tarvittaessa hitsattavilla kermikaistoilla. Tarvittaessa tiivistyksiä tulee parantaa vielä sisäpuolelta. Ilmansulun jatkokset julkisivuelementtien välillä tulee tehdä myös ilmatiiviiksi ja riittävistä limityksistä tulee huolehtia.

Ilmansulkukerros on mahdollista asentaa julkisivuelementtien tapauksessa vanhan betonisisäkuoren pintaan ennen uusien julkisivuelementtien asentamista. Ilmansulkupaperi voidaan kuitenkin asentaa myös elementissä olevan jäykistevanerin ulko- tai sisäpintaan. Ilmansulkupaperin sijainnilla rakenteessa ei havaittu laskentatarkasteluissa olevan merkittävää vaikutusta rakenteen lämpö- ja kosteusteknisessä toiminnassa. Kuitenkin asennettaessa ilmansulkupaperi jäykistevanerin ulko- tai sisäpintaan se pysyy paremmin suojassa kuin jos se olisi kiinni vanhassa, epätasaisessa betonikuoressa.

CLT-levyillä toteutetuissa julkisivu- ja tilaelementeissä ei tarvita erillistä ilman-/höyrynsulkukerrosta vaan rakenteessa CLT-levy muodostaa ilmansulun. Vaikka elementit ovat itsessään niin tiiviitä, että erillistä ilman- ja höyrynsulkukerrosta ei välttämättä tarvita, tulee elementtien saumojen ilmatiiviys varmistaa joka tapauksessa asentamalla saumoihin tiivistysnauhat ulko- tai sisäpuolelle. Saumojen tiivistykseen voidaan käyttää esimerkiksi paisuvia saumanauhoja tai joustavia saumamassoja.

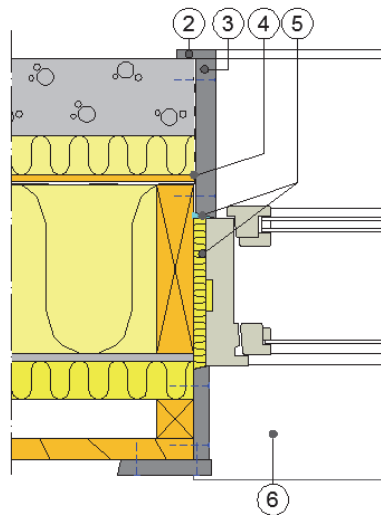
Kaikkien tutkittujen rakenteiden laskentamalleissa ilmansulkupaperi oli kuitenkin mukana uuden elementin jäykistevanerin pinnassa. Laskentatarkasteluissa betoni- ja tiilirakenteiset sisäkuoret mallinnettiin yhtenäisinä tasaisina rakenteina, joissa ei ollut epäjatkuvuuskohtia. Betoni- ja tiilisisäkuorien diffuusiovastukset olivat niin suuria verrattuna ilmansulkukerros diffuusiovastukseen, että ilmansulkukerros vaikutus laskentatuloksiin oli pieni. Myös tilaelementissä höyrynsulkukerros vaikutus laskentatuloksiin oli pieni, koska pelkän CLT-levyn diffuusiovastus yksinään oli niin suuri.

Jos vanhan sisäkuoren ilmatiiviys saadaan yksinään riittäväksi, riittää julkisivuelementeissä käytettävä jäykistevaneri rakenteen ilmansulkukerrokseksi. Myös puurankarunkoisten julkisivuelementtien väliset saumat tulee tiivistää huolellisesti riippumatta siitä käytetäänkö ilmansulkuna pelkkää jäykistevanerikerrosta vai lisätäänkö rakenteeseen erillinen ilmansulkukerros. Rakenteiden ilmatiiviyden parantamiseksi tulee pyrkiä myös katkaisemaan ilman pystysuuntainen kulku vanhan rakenteen ja

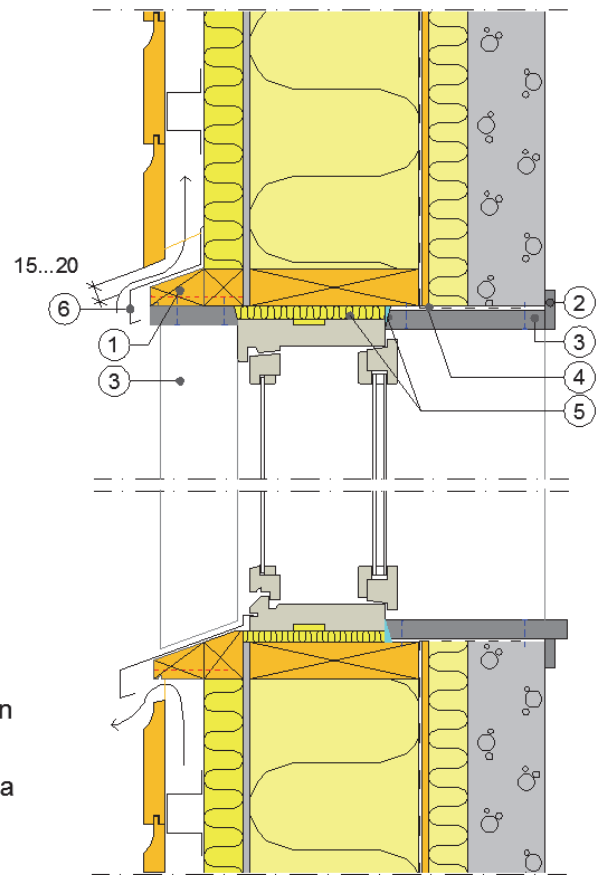
uuden elementin välissä tekemällä rakenteen ala- ja yläosien liitokset ilmatiiviiksi. Rakenteiden hyvä ilmatiiviys sekä rakenteiden ja julkisivujen liitosten huolellinen suunnittelu ja toteutus ovat edellytyksiä kosteuskuormien pienentämiselle ja rakenteiden hyvälle kosteustekniselle toiminnalle. Rakenteiden ilmatiiviyden lisäksi tulee huolehtia myös rakennusten riittävästä ilmanvaihdesta.

Tiilisen sisäkuoren ilmatiiviys tulee varmistaa tapauskohtaisesti. Tiilestä tehty sisäkuori voi olla paikalla muuraamalla tehty, jolloin tiilimuurissa saattaa olla saumojen kohdalla purseita ja saumat saattavat olla myös paikoitellen epätiiviit. Koska saumojia on paljon, on kaikkien saumojen tiivistäminen työlästä. Tämän vuoksi tiilisisäkuorissa rakenteissa on erityisen tärkeää katkaista ilman pystysuuntainen kulku vanhan rakenteen ja uuden elementin välissä tekemällä rakenteen ala- ja yläosien liitokset ilmatiiviiksi.

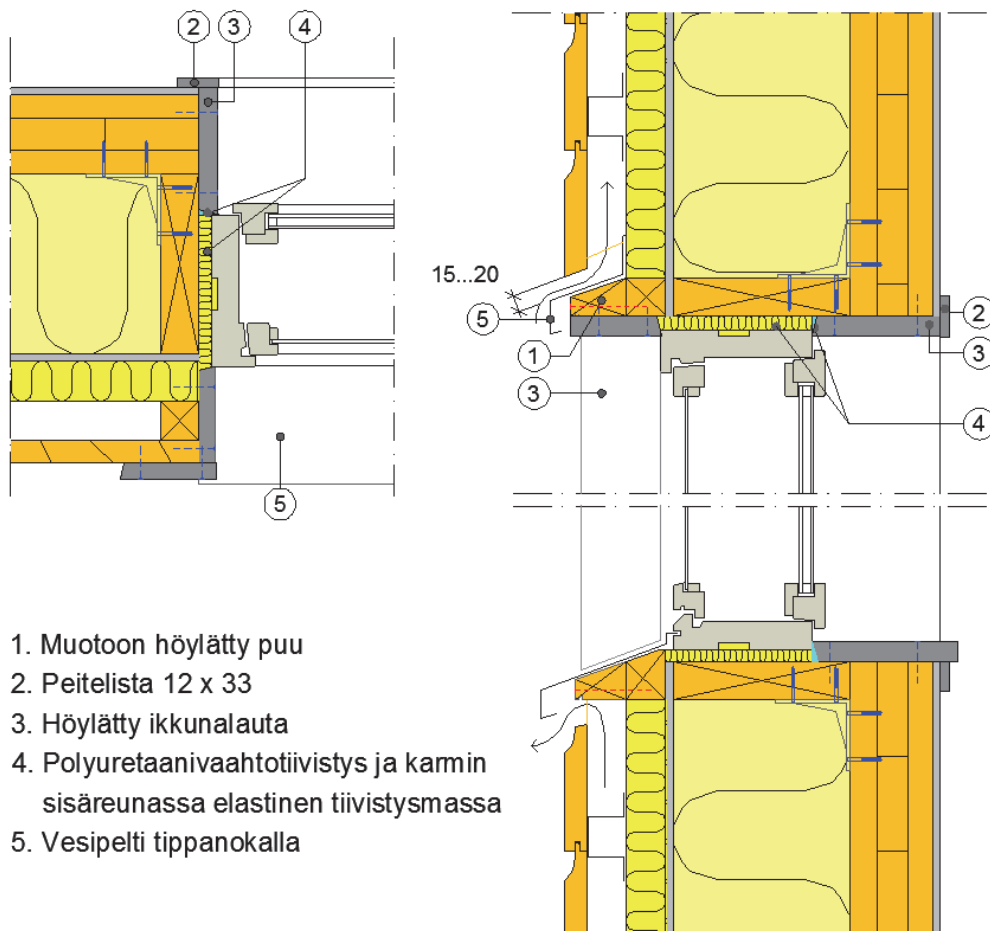
Ikkunaliitosten ilmatiiviydellä on suuri merkitys koko rakenteen ilmatiiviyden kannalta ja siksi niiden tiivistämiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Ikkunat on pyrittävä asentamaan rakenteessa mahdollisimman hyvin lämmöneristyksen kohdalle, jotta ikkunaliitosten kohdalla pystytään välttämään kylmäsillat. Ikkunat tulee asentaa kuitenkin niin, että ikkunoiden karmit saadaan luotettavasti tiivistettyä seinärakenteseen esimerkiksi polyuretaanivaahdon ja elastisen saumamassan avulla. Kuvissa 8.18, 8.19 ja 8.20 on esitetty esimerkit ikkunaliitoksista TES- ja CLT-elementtien tapauksessa.



1. Vesipellin alla muotoon höylätty puu
2. Peitelista 12 x 33
3. Höylätty ikkunalauta
4. Ilmansulun liimaus vanhaan runkoon
5. Polyuretaanivaahdotiivistys ja karmin sisäreunassa elastinen tiivistysmassa
6. Vesipelti tippanokalla

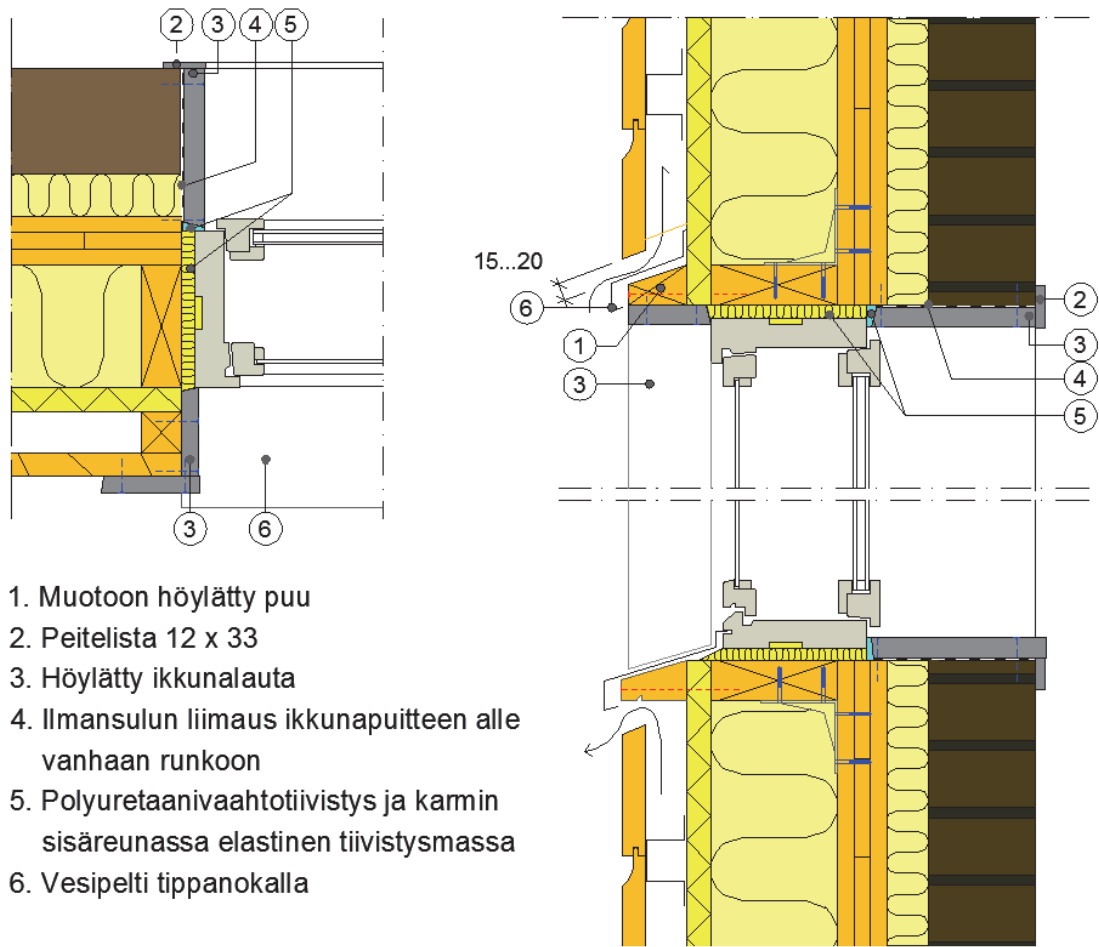


**Kuva 8.18** Esimerkki TES-elementin ikkunaliitoksesta betonisäkuoren yhteydessä.



**Kuva 8.19** Esimerkki CLT-tilaelementin ikkunaliitoksesta

Ikkunoiden ja ovien lämmöneristys on huomattavasti heikompi kuin ulkoseinien ja yläpohjien. Ikkunat tulee lähtökohtaisesti asentaa rakenteeseen syvyysuunnassa kokonaan lämmöneristykseen kohdalle kylmäsilan pienentämiseksi. Ikkunan karmi ja ulkoseinän ilmansulkukerros tulee liittää tiiviisti yhteen. Tiivistäminen voidaan tehdä usein kerroksittaisella polyuretaanivaahdotuksella ja/tai karmin ja seinän välisellä elastisella saumauksella. Saumamassan tulee olla sisäkäyttöön soveltuvaa. Täytettäessä sauma mineraalivillakaistalla tulee sisäpuolinen ilmatiiviys varmistaa esimerkiksi pohjanauhan ja elastisen saumamassan avulla tai erikoisliimanauhalla, jonka pitkäaikaiskestävyys ja tartuntakyky on riittävä. (Lahdensivu et al. 2012)



**Kuva 8.20** Esimerkki CLT-julkisivuelementin ikkunaliitoksesta tiilisisäkuoren yhteydessä

## 9 LASKENTATULOSTEN ANALYSOINTI

Tässä kappaleessa on tehty laskentatulosten tarkastelu sekä virhearvio. Tulosten tarkastelussa on esitetty päätelmät laskentatuloksista sekä verrattu niitä FRAME-tutkimuksen tuloksiin. Virhearviossa on esitetty laskennan mahdolliset virhelähteet.

### 9.1 Perusratkaisut ja hyvin lämpöä eristävän tuulensuojan käyttö

Laskelmien mukaan puurankarunkoiset TES- ja CLT-rakenteiset julkisivu- ja tilaelementit ovat lämpö- ja kosteusteknisesti toimivia korjausratkaisuja kerrostalojen korjaamiseen ja laajentamiseen, kunhan huolehditaan tuulensuojan riittävästä lämmönvastuksesta tai lisäeristyksestä tuulensuojan ulkopuolella. Laskelmien mukaan pelkkä tuulensuojakipsilevy ei ole riittävä ratkaisu tuulensuojaksi julkisivuelementteihin. Myös FRAME-tutkimuksen (Vinha et al. 2013) loppuraportissa todetaan puurankarunkoisista ulkoseinistä, että niissä huonosti lämpöä eristävä tuulensuoja on kriittinen tulevaisuuden ilmastossa, koska tuulensuojan lämmönvastuksen ollessa pieni, seinärakenteen ulko-osan suhteellinen kosteus nousee talvella. Samaan loppuratkaisuun päädyttiin tässä diplomityössä julkisivuelementtien ja tilaelementtien seinärakenteissa.

Alkuperäisten ratkaisujen hyväksyttävyyden arvioinnin jälkeen rakenteita muutettiin niin, että ne täyttäisivät asetetut kriteerit. Toimiviksi tuulensuojaratkaisuiksi laskelmissa havaittiin rakenteesta riippuen tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelle asennettava 50 mm paksuinen mineraalivillasta tehty lisäeristekerros tai tuulensuojakipsilevyn tilalle asennettava jäykkä, tuulensuojapinoitettu 30 mm paksuinen tuulensuojavilla.

Rakenteesta US 1 tehtiin testilaskelmia myös muilla tuulensuojavaihtoehdoilla. Rakenteissa US 1.1–1.3 käytettyjen tuulensuojaratkaisujen lisäksi laskentatarkasteluissa kokeiltiin myös 12 mm ja 25 mm paksuja huokoisia puukuitulevyjä (esim. Tuulileijona ja Runkoleijona) sekä ratkaisua, jossa tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelle laitettiin 30 mm paksu lisäeriste. Kuten rakenteen US 1.1 kohdalla jo todettiin, tuulensuojakipsilevyn lämmönvastus  $0,045 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$  ei ole riittävä kyseisen seinärakenteen tuulensuojan lämmönvastukseksi. Sen sijaan kaikilla muilla kokeilluilla tuulensuojavaihtoehdoilla rakenne US 1 oli toimiva. Kokeiltaessa 12 mm paksuista huokoista puukuitulevyä tuulensuojana rakenteen homeindeksit pysyivät kaikissa tarkastelupisteissä sallituissa rajoissa, mutta tulevaisuuden ilmastossa tarkastelupisteessä 3 suhteellisen kosteuden maksimiarvo nousi hetkellisesti arvoon 97 % RH, joten rakenteen käyttäminen ei ole kuitenkaan suositeltavaa, vaikka homehtumista ei tapahdu-



kaan. Muilla tuulensuojavaihtoehtoilla sekä homeindeksit että suhteelliset kosteudet pysyivät sallituissa rajoissa. Parhaiten toimiva tuulensuojaratkaisu testirakenteessa US 1 oli tuulensuojakipsilevy sekä sen ulkopuolelle asennettu 50 mm paksuinen lisäeriste (ks. Rakenne US 1.2). Toiseksi parhaiten toimiva ratkaisu oli 30 mm paksulla tuulensuojavillalla varustettu rakenne. (ks. Rakenne US 1.3).

Myöskään tilaelementeissä pelkkä tuulensuojakipsilevy ei ole toimiva ratkaisu seinärakenteen tuulensuojana vaan rakenteesta riippuen tuulensuojana tulee käyttää joko 50 mm paksuista mineraalivillalisäeristettä tuulensuojakipsilevyn ulkopuolella tai jäykkää, 30 mm paksuista, tuulensuojapinnoitettua tuulensuojavillaa. Tällä tavoin tilaelementtien seinärakenteista saadaan kosteusteknisesti turvallisia rakenteita sekä nyky- että tulevaisuuden ilmastossa. Kaikissa edellä tarkastelluissa rakenteissa on ollut erillinen puurunko. Jos esimerkiksi CLT-rakenne toteutetaan niin, että päälämöneristekerroksen läpäiseviä puuosia ei ole, niin tällöin rakenteen ulko-osat toimivat kosteusteknisesti vähintään yhtä hyvin kuin edellä tarkastellut rakenteet. Termorankoja tai pistemäisiä kiinnikkeitä suurempien teräsosien aiheuttamien kylmäsiltojen vaikutukset tulee tarvittaessa selvittää erikseen.

## **9.2 Lisätarkastelut**

### **9.2.1 Tarkastelupisteiden väliset erot**

Kriittisimmäksi pisteeksi ja pääasiassa rakenteiden mitoittavaksi tarkastelupisteeksi osoittautui laskelmissa tarkastelupiste 2 rakenteen ulko-osassa runkotolpan ja tuulensuojan rajapinnassa. Vaikka olosuhteet tarkastelupisteessä 3 olivat paikoin jopa kriittisemmät kuin tarkastelupisteessä 2, sai homeindeksi silti pienempiä arvoja tarkastelupisteessä 3, koska siinä homehtumisherkkyyssluokka oli suurempi. Tarkastelupisteessä 2 homehtumisherkkyyssluokka valittiin puurungon mukaan, jolloin homehtumisherkkyyssluokka oli 1. Tarkastelupisteessä 3 homehtumisherkkyyssluokka taas valittiin tuulensuojan mukaan, jolloin homehtumisherkkyyssluokkana käytettiin tuulensuojasta riippuen arvoa 2 tai 3. Tarkastelupisteessä 1 tulokset ovat pääosin paremmat kuin tarkastelupisteessä 4, vaikka olosuhteet ovatkin pisteissä melko samanlaiset. Ero johtuu todennäköisesti siitä, että tarkastelupisteessä 1 on enemmän puuta, joka hygroskooppisuutensa vuoksi tasapainottaa suhteellisen kosteuden huippuarvoja ja näin ollen heikentää homeen kasvun edellytyksiä.

### **9.2.2 Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus**

Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuutena käytettiin perustapauksissa puuverhotuilla seinillä pohjoisjulkisivuilla 100 l/h ja tiiliverhotuilla seinillä eteläjulkisivulla 10 l/h. Käytetyt ilmanvaihtuvuuksien arvot valittiin kirjallisuustutkimuksiin perustuen. Laskennassa käytetyt ilmanvaihtuvuuksien arvot osoittautuivat riittäviksi ilmanvaihtuvuuden arvoiksi kyseisillä rakenneratkaisuilla. Tutkimuksessa tehtiin rakenteiden koste-

usteknisen toimivuuden testaus nykyilmastossa yhdellä koerakenteella myös muilla tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuksilla.

Puuverhotulla julkisivuelementillä testattiin 50 mm paksuisessa tuuletusraossa ilmanvaihtuvuuksia 10 l/h, 40 l/h, 50 l/h, 75 l/h, 100 l/h sekä 200 l/h. Rakenne oli toimiva nykyilmastossa kaikilla muilla ilmanvaihtuvuuksilla paitsi ilmanvaihtuvuuden arvolla 10 l/h. Myös 40 l/h ilmanvaihtuvuudella homeindeksit nousivat hyvin lähelle raja-arvoa, jolloin riski homeen kasvu on olemassa. Parhaiten rakenne toimi ilmanvaihtuvuuden arvoilla 100 l/h sekä 200 l/h. Homeindeksien arvot pienenevät tasaisesti korotettaessa ilmanvaihtuvuuden arvoa ja laskivat kaikissa tarkastelupisteissä lähes nollaan siirryttäessä ilmanvaihtuvuuden arvoon 200 l/h. Myös suhteellisen kosteuden arvot laskivat ilmanvaihtuvuuden kasvaessa. Laskelmien mukaan puuverhotuissa rakenteissa toimiva tuuletusraon koko oli 50 mm.

### 9.2.3 Ulkoverhouksen vaikutus

Rungoltaan samanlaisten julkisivuelementtien toimintaa kokeiltiin laskelmissa myös erilaisilla julkisivuverhouksilla. Rakenteissa US 3.1 ja US 4.1 sisäkuoret ja julkisivuelementit olivat samanlaiset, mutta rakenteen US 3.1 julkisivuverhous oli puuta ja rakenteen US 4.1 julkisivuverhous toteutettiin levyrappauksella. Laskelmien tuloksista voidaan todeta, että tiiviimpänä julkisivumateriaalina levyrapattu julkisivu toimii hieman paremmin kuin puuverhottu rakenne.

Myös puuverhouksen paksuudella oli laskelmien mukaan merkitystä rakenteen toimintaan. Rakenteissa US 1.1 ja US 2.1 ainoa ero rakenteissa oli julkisivuverhouksessa, joka oli rakenteessa US 2.1 16 mm:ä paksumpi. Paksummalla ja tiiviimmällä julkisivuverhouksella rakenne US 2.1 oli toimiva rakenne myös silloin, kun pelkkä tuulensuojakipsilevy oli rakenteen tuulensuojana. Kuitenkin tulevaisuuden ilmastossa rakenteessa homeindeksi nousee lähelle arvoa 1, joten myös tässä rakenteessa suositellaan käytettävän lisäeristettyä tuulensuojakipsilevyn ulkopuolella. Laskentatarkastelujen perusteella myös tuuletusraon paksuus vaikutti rakenteen kosteustekniseen toimintaan, kuten edellä on todettu.

Myös rakenteissa US 5.1 ja US 6.1 vanha sisäkuori ja julkisivuelementin runko olivat pääosin samanlaiset, mutta elementtien ulkoverhous oli erilainen. Rakenteessa US 5.1 ulkoverhous toteutettiin niin sanotulla sadetakkirakenteella ja tiiliverhouksella, kun taas rakenteessa US 6.1 julkisivuverhouksena käytettiin pelkkää puuta. Näistä kahdesta rakenteesta tiiliverhottu rakenne toimi paremmin. Tiiliverhotussa rakenteessa homeindeksit saivat kaikissa tarkastelupisteissä arvon nolla ja suhteelliset kosteudet kaikissa muissa tarkastelupisteissä olivat alle 80 % RH paitsi tarkastelupisteessä 3, jossa suhteellinen kosteus nousi sekä nyky- että tulevaisuuden ilmastossa hieman yli 80 % RH.

Puuverhotussa rakenteessa homeindeksien arvot nousivat hieman nollan yläpuolelle ja suhteellisten kosteuksien arvot nousivat paikoitellen yli 90 % RH. Puuverhotussa rakenteessa lämpötilat olivat matalammat ja suhteellisen kosteuden arvot olivat korkeammat kaikissa tarkastelupisteissä. Ero rakenteiden arvoissa johtuu siitä, että tiiliverhotussa rakenteessa rakenne on toteutettu tiiliverhouksen lisäksi tuuletetulla peltiulkoverhouksella, jolloin ulkoilman aiheuttama kosteusrasitus ei pääse vaikuttamaan juurikaan rakenteen sisäosiin. Tällainen sadetakkirakenteella toteutettu tiiliverhottu puurankarunkoinen seinärakenne on todettu toimivaksi rakenneratkaisuksi korkeilla ( $> 10$  m) tiiliverhotuilla seinillä FRAME-tutkimuksessa (Vinha et al. 2013). Tässä työssä laskennasta saatujen tulosten mukaan vastaava rakenne on mahdollisesti toimiva myös julkisivuelementtirakenteessa.

#### 9.2.4 Ilmastomuutos

Laskelmien mukaan voidaan todeta, että tulevaisuudessa rakenteiden toiminta heikenee ilmasto-olosuhteiden muuttuessa ennustetun kasvihuonekaasuskenaario A2:n mukaan. FRAME-tutkimuksessa (Vinha et al. 2013) todetaan, että ilmastomuutos ja kiristyneiden energianmääräysten mukainen lämmöneristyksen lisääminen heikentävät monien nykyisillä menetelmillä toteutettujen vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa ja vikasietoisuutta.

Tässä diplomityössä kaikissa rakenteissa homeindeksien ja suhteellisten kosteuksien arvot nousivat tulevaisuuden ilmastossa verrattuna nykyilmaston arvoihin, mutta suuremmilla tuulensuojan lämmönvastuksilla rakenteet olivat toimivia myös tulevaisuuden ilmastossa. Tulevaisuuden ilmastossa rakenteiden lämpötilat ja suhteelliset kosteudet ovat korkeammat kaikissa tarkastelupisteissä verrattuna nykyilmastoon ja riittämätön tuulensuojan lämmönvastus on vielä kriittisempi tulevaisuuden ilmastossa kuin nykyilmastossa. Yleinen suunta laskelmissa on, että ilmastomuutoksen aiheuttama suhteellisen kosteuden kasvu on suurempaa rakenteen sisäosissa kuin rakenteen ulko-osissa.

### 9.3 Virhearvio

Tuloksissa on hyvä ottaa huomioon, että laskennassa tarkastellut rakenteet olivat ideaalisia eikä rakennusvirheitä, käyttövirheitä tai kosteusvuotoja otettu tässä diplomityössä huomioon. Mahdolliset virheet saattavat aiheuttaa muutoksia rakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa todellisessa tilanteessa. Tuloksia arvioitaessa tulee ottaa huomioon, että rakenteet joiden päälle julkisivuelementit rakennetaan, ovat vanhoja ja rakenteiden laatu voi olla hyvinkin vaihtelevaa.

Koska tutkittavat rakenteet olivat kaikki elementtirakenteisia, oletettiin, että seinärakenteet ovat olleet kokoonpanon aikana suojattuna ulkoisilta säärasituksilta ja rakentaminen on suoritettu siten, että ylimääräistä kosteutta ei ole päässyt kertymään sei-

närakenteisiin. Tarkasteluissa olleiden CLT-elementtien CLT-rungot oletettiin laskelmissa yhtenäisiksi puukerroksiksi ilman liimasaumojia. Tämä on varmalla puolella oleva oletus, koska liimasaumojia sisältävän elementin vesihöyrynvastus on sama tai hieman korkeampi kuin vastaavan pelkän puulevyn vesihöyrynvastus (Valtion teknillinen tutkimuskeskus 2011).

Työssä oletettiin myös, että tuuletusväliin ei pääse tunkeutumaan vettä tai lunta tuulen tai viistosateen vaikutuksesta. Laskelmissa vaikuttava sateen aiheuttama kuormitus kuvaa pelkästään rakenteen ulkopintaan kohdistuvaa viistosateen vaikutusta. Jos kosteutta pääsee tuuletusväliin, aiheuttaa se suuremman kosteusrasituksen rakenteelle ja poikkeamia laskelmiin todennäköisesti syntyy. Riski veden tunkeutumisesta tuuletusväliin koskee kaikkia tuuletettuja rakenteita ja saattaa aiheuttaa homehtumisvaaraa etenkin puurunkoisilla seinäratkaisuilla. Tämän vuoksi rakenteita suunniteltaessa tulee ottaa huomioon myös detaljien, kuten vesipeltien rakentaminen ja sijoittaminen.

Ilmasto-olosuhteet, joita laskentatarkasteluissa käytettiin, on todettu FRAME-projektissa kriittisiksi, kun rakenteiden toimintakriteereinä pidettiin homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista rakenteen sisällä. Testivuosien käytössä tulee ottaa huomioon, että käytetyt testivuodet vastaavat noin joka kymmenes vuosi esiintyviä ulkoilman olosuhteita, mutta eivät ota huomioon rakennuksen ympärillä vallitsevia paikallisia olosuhteita. Rakennuksen ympärillä vallitseva mikroilmasto voi vaikuttaa rakenteen toimintaan kriittisestikin. Näiden asioiden vuoksi rakenteet tulee suunnitella siten, että asetetut raja-arvot homeen kasvulle ja kosteuden kondensoitumiselle alittuvat selvästi.

## 10 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kappaleessa 10 on tehty diplomityön yhteenveto. Tässä kappaleessa on tehty myös tutkimusmenetelmien tarkastelu sekä johtopäätökset työstä. Kappaleen lopussa on annettu myös jatkotutkimusehdotuksia aiheesta.

### 10.1 Yhteenveto

Tämä diplomityö tehtiin osana kansallista KLIKK-hanketta (Lähiöiden käyttäjä- ja liiketoiminatalähtöinen korjauskonsepti), jossa tavoitteena oli kehittää Suomen lähiöiden korjausrakentamisen menetelmiä. Vuoden 2012 tammikuussa alkaneen ja vuoden 2014 joulukuussa päättyneen KLIKK-hankkeen päätavoitteena oli kehittää käyttäjälähtöinen, teollinen, kokonaistaloudellinen sekä tehokas korjauskonsepti lähiökerrostalojen korjaamiseen ja laajentamiseen.

Tässä diplomityössä tutkittiin puisten suurelementtiseinien ja uudis- ja täydennysrakentamisessa käytettävien tilaelementtien seinien lämpö- ja kosteusteknisistä toimivuutta nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa Suomessa. Työn tarkoituksena oli löytää lämpö- ja kosteusteknisesti toimivia seinärakennusratkaisuja lähiökerrostalojen korjaamiseen ja laajentamiseen. Rakenteet, joita tutkittiin, olivat KLIKK-hankkeessa suunniteltuja korjausehdotuksia eri lähiökerrostalojen kunnostamiseen. Kaikki tutkimuksessa mukana olleet rakenteet mallinnettiin ensimmäisen kerran alkuperäisen mallin mukaan. Jos rakenteiden toiminnassa havaittiin puutteita, rakenteita muokattiin siten, että ne toimivat asetettujen toimintakriteerien mukaisesti.

Diplomityössä tutkittiin kymmentä erilaista TES- ja CLT-rakenteista seinärakennetta nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Työssä tutkittavista seinärakenteista kahdeksan oli julkisivuelementtien ja kaksi tilaelementtien rakenteita. Yhteensä alkuperäisiä ja korjattuja rakenteita oli laskennassa mukana 18 kappaletta. Julkisivuelementtirakenteiden seinien toimivuutta tutkittiin vanhojen kerrostalon seinärakenteiden yhteydessä ja tilaelementtien seinärakenteita tutkittiin yksinään. Ulkoverhousmateriaaleina laskennassa käytettiin tuuletettuja puu-, tiili- ja levyrappausverhouksia.

Työssä seinärakenteiden tutkimiseen käytettiin TTY:llä kehitettyä vaipparakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmää, joka on tarkin tällä hetkellä käytössä oleva analysointimenetelmä rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tutkimiseen. Rakenteiden toiminnan selvitys tehtiin laskennallisesti mitoitettavissa sisä- ja ulkoilman olosuhteissa ja rakenteiden toimintaa arvioitiin erilaisten

toimintakriteerien avulla. Tutkimuksessa tehdyt laskennat suoritettiin saksalaisella epästationääriseen laskentaan tarkoitetulla numeerisella Delphin 5.8.1-simulointiohjelmalla. Kaikki laskennat suoritettiin muuttuvissa lämpö- ja kosteusolosuhteissa ja laskentatarkastelujen kestonä käytettiin kahden vuoden ajanjaksoa tammi-kuun alusta alkaen.

Ulkoilman olosuhteina käytettiin TTY:llä määritettyjä rakennusfysikaalisia testivuotia sekä nykyilmastossa (Jokioinen 2004, Vantaa 2007) että vuoden 2050 ilmastossa. Rakennusfysikaalisten testivuotien valinnassa on noudatettu noin 90 % kriittisyystasoa, jonka mukaan vähintään noin 90 % vuosista tulee olla vähemmän kriittisiä tarkasteltavien toimintakriteerien suhteen kuin testivuotien. Puuverhotuille seinärakenteille valittiin testivuotiksi Jokioisen testivuodet (2004, 2050), jotka ovat kriittisempiä vesitiiviille tai sadevettä huonosti imeville julkisivuverhouksille. Tiiliverhotuille seinärakenteille testivuotiksi valittiin Vantaan testivuodet (2007, 2050), jotka ovat kriittisempiä sadevettä imeville julkisivuverhouksille. Laskentatarkasteluissa julkisivun ilmansuuntana puuverhotuilla seinillä käytettiin pohjoista ja tiiliverhotuilla seinillä etelää.

Sisäilman olosuhteina käytettiin RIL 107–2012:ssa (2012) annettuja sisäilman lämpötilan ja kosteuslisän mitoitusarvoja kosteusluokassa 2. Sisäilman lämpötilana käytettiin koko laskenta-ajan vakiolämpötilaa  $+ 21\text{ °C}$  ja kosteuslisänä ulkolämpötilan mukaan tunneittain muuttuvaa kosteuslisän määrää, joka oli talvella  $5\text{ g/m}^3$  ja kesällä  $2\text{ g/m}^3$ .

Rakenteiden toimintakriteereinä käytettiin homeen kasvua sekä kosteuden kondensoitumista. Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan arviointi tehtiin tarkastelupisteiden kosteustasojen ja kriittisten pisteiden laskennallisten homeindeksien avulla. Homeen kasvua arvioitiin VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämän parannetun homemallin avulla. Kosteuden kondensoitumista arvioitiin tarkastelupisteissä olevan suhteellisen kosteuden suuruuden perusteella. Lähes kaikissa tarkasteluissa homeen kasvu oli mittaava kriteeri. Rakenteiden toimintaa arvioitiin tunnin välein saatujen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvojen perusteella ja homeindeksien laskenta suoritettiin syöttämällä saatu laskentadata homeen kasvun laskentamallin kaavoihin.

## 10.2 Johtopäätökset

Laskennallisen tarkastelun perusteella voidaan todeta, että puurakenteiset julkisivuelementit ja tilaelementit ovat toimivia rakenneratkaisuja lähiökerrostalojen korjaamiseen Suomen ilmasto-olosuhteissa, kunhan elementtien rungon ulkopuolelle asennetaan riittävällä lämmönvastuksella varustettu tuulensuojalevy tai tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelle lisälämmöneriste. Työssä esitetyissä alkuperäisissä rakenneratkaisuissa tuulensuojalevyksi ehdotettu pelkkä tuulensuojakipsilevy rakenteen tuu-

lensuojana ei ole suurimmassa osassa rakenteita toimiva ratkaisu, koska tällöin tuulensuojan lämmönvastus on liian pieni.

Osassa tarkastelluista rakenteista tuulensuojakipsilevy tai tuulensuojakangas oli lisäeristeen ulkopinnassa ja silti tarkastelupisteet olivat rungon ulkopinnassa. Tässä kohdalla on käytetty virheellistä laskentatapaa, koska tällöin tarkastelupisteet eivät ole olleet tuulensuojakerroksen sisäpinnassa. Näiden rakenteiden kohdalla tulee tehdä tarkastuslaskentoja, jotta voidaan varmistua rakenteiden toimivuudesta tilanteessa, jossa tuulensuojakerros tuodaan kiinni kantavaan runkoon ja lisäeriste siirretään tuulensuojakerroksen ulkopuolelle tai lisäeristeen ja tuulensuojakipsilevyn tilalle vaihdetaan jäykkä tuulensuojavilla. Tutkimuksen aikana tehtyjen muiden laskentojen perusteella voidaan kuitenkin todeta, että rakenteen uloimpien tarkastelupisteiden homeindeksit eivät ole muuttuneet merkittävästi siirrettäessä tuulensuojakerros lisäeristeen sisäpuolelle.

Koska tarkastelluissa rakenteissa viistosateen vaikutukset rakenteeseen on saatu riittävän alhaiselle tasolle, pystyttiin elementeissä käytettyjen kantavien puurankojen lämpö- ja kosteusolosuhteita parantamaan selvästi ulkopuolisella lämmöneristyksellä. Laskennan mukaan varmasti toimivia ja kosteusteknisesti turvallisia ratkaisuja ovat 50 mm paksuisen lisäeristuksen käyttäminen tuulensuojakipsilevyn ulkopuolella tai jäykän 30 mm paksuisen tuulensuojapinnoitetun tuulensuojavillan käyttö tuulensuojana kipsilevyn tilalla. Mainituilla tuulensuojaratkaisulla rakenteiden homeindeksit jäivät alle raja-arvon  $M_{\max} < 1$ . Tehtyjen lisätarkastelujen ja aiempien tutkimusten mukaan kantavien rakenteiden ulkopuolelle rakenteesta riippuen riittävä lämmönvastus nykyisessä ja vuoden 2050 ilmastossa on noin  $0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$ , mikä vastaa esimerkiksi 12 mm paksuista huokoista puukuitulevyä.

Rakenteiden hyvä ilmatiiviys ja rakenteiden ja julkisivujen liitosten huolellinen suunnittelu ja toteutus ovat edellytyksiä kosteuskuormien vähentämiselle ja rakenteiden hyvälle lämpö- ja kosteustekniselle toiminnalle. Jos vanhan rakenteen vesihöyrynvastus on itsessään riittävä, tulee ilmansulkukerroksen olla vesihöyryä läpäisevä, jotta rakenteeseen ei muodostu kahta vesihöyrytiivistä pintaa vierekkäin. Rakenteen ilmatiiviydessä ja diffuusiotiiviydessä tulee ottaa huomioon myös mahdolliset betonielementtien halkeamat, elementtien saumat, ikkunoiden ja ovien liitokset sekä erilaisten läpivientien aukot tiiviyttä heikentävänä tekijänä. Nämä kohdat tulee tiivistää tarkasti esimerkiksi joustavalla tiivistysmassalla tai -vaahdolla ja tarvittaessa bitumikerminauhoilla. Tarvittaessa tiivistyksiä tulee parantaa vielä sisäpuolelta. Ilmansulun jatkokset julkisivuelementtien välillä tulee tehdä myös ilmatiiviiksi ja riittävistä limityksistä tulee huolehtia.

Laskentatarkasteluissa rakenteiden kriittisimmiksi pisteiksi osoittautuivat sekä julkisivuelementeillä että tilaelementeillä seinärakenteen rungon ulko-osassa tuulen-

suojan sisäpinnassa sijaitsevat tarkastelupisteet. Parantamalla rakenteiden tuulensuojan lämmönvastusta saadaan olosuhteet rakenteiden ulko-osissa muutettua homeen kasvulle ja kosteuden kondensoitumiselle epäsuotuisiksi.

Laskelmista havaittiin, että tulevaisuudessa rakenteiden toiminta heikkeni ilmasto-  
muutoksen edetessä nykyilmastosta vuoden 2050 ilmastoon. Kuitenkin myös tulevaisuuden ilmastossa julkisivuelementtien ja tilaelementtien seinärakenteet saatiin kosteusteknisesti toimiviksi parantamalla tuulensuojan lämmönvastusta yllä mainitulla tavalla.

Tässä työssä tehty laskennallinen tarkastelu kuvaa seinärakenteiden toimintaa tietyissä lämpötila- ja kosteusolosuhteissa ja rakenteita tietyillä materiaaliominaisuuksilla varustettuna. Laskennallisella mallintamisella pystytään arvioimaan tietyn rakenteen toimintaa määrätyissä olosuhteissa määrätyllä ajanjaksolla sisä- ja ulkopuolisen kosteusrasituksen aikana. Rakenteiden toimivuutta tulee kuitenkin arvioida laskennallisen mallintamisen lisäksi myös tietyn kohteen riskien mukaisesti ja kohdekohtainen vaikutus rakenteiden toimivuuteen tulee ottaa huomioon. Lisävarmuutta laskentaan saatiin asettamalla kosteuden kondensoitumisen ja homeindeksin raja-arvot riittävän alhaisiksi.

### 10.3 Tutkimusmenetelmien tarkastelu

Tutkimusmenetelminä tässä diplomityössä käytettiin kirjallisuusanalyysiä sekä simuloitiohjelmalla tehtyjä kokeellisia tutkimuksia. Kirjallisuusanalyysin avulla selvitettiin rakenteiden perusominaisuudet ja käytiin läpi aihepiirin taustateoriaa sekä rakenteisiin vaikuttavien rakennusfysikaalisten ilmiöiden perusteita. Kirjallisuusanalyysin avulla saatiin riittävä pohjatieto laskelmien suorittamiseen ja laskennan tulosten tulkittamiseen. Kuitenkaan vastaavia tutkimuksia, joissa julkisivuelementtien toimivuutta olisi tutkittu vanhan seinärakenteen yhteydessä, ei työn aikana löytynyt. Tämä asetti haasteita tulosten vertailuun, koska täysin vastaavien laskelmien antamaa vertailupohjaa ei ollut. Kuitenkin julkisivuelementtirakenteet vanhan seinän yhteydessäkin noudattavat samoja peruseriaatteita seinien rakennusfysikaalisessa toiminnassa kuin tavalliset seinärakenteet, joiden toimintaan julkisivuelementtirakenteita työssä verrattiin. Kirjallisuusanalyysin tekemiseen löytyi kattavasti materiaalia sekä Internetistä että kirjastosta.

Laskennallisten tarkastelujen avulla rakenteiden toimintaa pystyttiin arvioimaan erilaisissa olosuhteissa ja rakenteiden toiminnasta saatiin hyvä käsitys sekä nyky- että tulevaisuuden ilmastoissa. Erilaisia laskentatarkasteluja eri rakenteille tehtiin työn aikana useita kymmeniä ja aikaa eri laskentatapauksiin kului yhteensä satoja tunteja. Laskentaohjelman toiminnasta saatiin siis hyvä käsitys laskennan yhteydessä. Seinärakenteet oletettiin ilmatiiviiksi ja rakennusvirheitä tai liitoksia ei laskelmissa otettu



huomioon. Tästä syystä laskentatulokset vastaavat vain oikein tehtyjä rakenteita ja mahdollisten työvirheiden seurauksena rakenteisiin pääsevä kosteus saattaa vaikuttaa rakenteiden kosteustekniseen toimintaan ja synnyttää rakenteisiin homeen kasvulle otolliset olosuhteet. Jotta rakenteiden toimivuudesta saadaan täysi varmuus myös rakennusvirheen tai mahdollisen kosteusvuodon sattuessa, tulisi rakenteille tehdä myös ilma- ja kosteusvuototarkasteluja. Laskelmat voidaan tehdä tutkimuksessa käytetyllä Delphin 5.8.1-ohjelmalla, mutta niitä ei tässä työssä tehty rajallisen ajan vuoksi.

Työssä käytetyt tutkimusmenetelmät olivat toimivia, mutta lisälaskentaa erilaisilla rakenneratkaisuilla tulisi kuitenkin vielä tehdä. Mahdolliset vertailulaskelmat esimerkiksi WUFI 2D-ohjelmalla antaisivat lisävarmuutta laskennan tuloksiin. Kokeellisia tutkimuksia tulisi tehdä lisää erilaisilla materiaaleilla ja erilaisilla rakenneratkaisuilla. Rakenteiden toimivuutta tulisi testata myös vielä pidemmällä tulevaisuudessa vuoden 2100 testi-ilmastoilla. Työssä laskennallisesti tutkituille rakenneratkaisuille olisi hyvä tehdä myös laboratoriokokeita tai kenttätutkimuksia tulosten tarkkuuden varmistamiseksi.

## 10.4 Jatkotutkimusehdotukset

Saadut tulokset ovat lupaavia, mutta laskentatarkasteluja tarvitaan lisää ja niitä tulee tehdä erilaisilla materiaaliominaisuuksilla ja rakenteiden toiminnan osalta tulee tarkastella myös rakennusvirheiden vaikutuksia. Myös tilaelementtien muista vaipparakenteista olisi hyvä tehdä laskentatarkasteluja vastaavalla ohjelmalla. Esimerkiksi ikkuna- ja oviliitosten vaikutuksia elementtien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan tulisi tutkia lisää.

Ilma- ja kosteusvuotojen tarkastelu sekä tuuletusvälissä olevien palokatkojen vaikutuksen arviointi ilmanvaihtuvuuteen tulisi tehdä jatkotutkimuksena. Palokatkojen vaikutusta tuuletusvälissä voitaisiin tutkia esimerkiksi COMSOL Multiphysics-simulointiohjelmalla. Jatkotutkimuksena julkisivuelementtirakenteista voitaisiin tehdä myös tutkimus, jossa vertaillaan eri materiaalien ja eristepaksuuksien vaikutusta yhdessä rakennemallissa. Tällaisella tutkimuksella voitaisiin rakenteiden materiaalit ja eristepaksuudet saada optimaalisiksi rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta.

## LÄHTEET

Assessment: Declared thermal conductivity, 2009, SP Ruotsin tekninen tutkimusinstituutti, SE-50462 Borås

Airaksinen, M., Hietanen, O., Manninen, A-P., Reijula, K., Vainio, T. 2011. Rakennetun ympäristön roadmap, Loppuraportti, Helsinki, Tekes. 69 s. + 9 liites.

Björkholtz, D. 1997. Lämpö ja kosteus, rakennusfysiikka. 2. painos, Rakennustieto Oy. 150 s.

CLT Handbook, Cross-laminated-timber, U.S. Edition, Edited by Karacabeyli, E & Douglas, B. 2013. FP Innovations, Pointe-Claire, Canada. 572 p.

Hagentoft, C.-E. 2001. Introduction to Building Physics. Lund, Studentlitteratur. 422 p.

Hukka, A. & Viitanen, H. 1999. A Mathematical model of Mould Growth on Wooden Material. Wood Science and Technology, Vol. 33, pp. 475-485.

Innova -projekti, Riihimäki, www-sivut, Saatavilla: [http://www.omataloyhtio.fi/tuoteinfo/TM\\_1224\\_kerrostalonpassiivisaneeraus.htm#.VA2D4xBfZMQ](http://www.omataloyhtio.fi/tuoteinfo/TM_1224_kerrostalonpassiivisaneeraus.htm#.VA2D4xBfZMQ) [viitattu 1.9.2014]

Jylhä, K., Ruostenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S. & Seitola, T. 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2009:4. 102 s.

Jylhä K., Kalamees T., Tietäväinen H., Ruostenoja K., Jokisalo J., Hyvönen R., Ilomets S., Saku S. & Hutila A. 2011a. Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastomuutoksen vaikutuksista, Ilmatieteen laitos, Raportteja No. 2011:6, Helsinki.

Koiso-Kanttila, J., 2013, Kerrostalojen energiatehokkuus ja lisärakentaminen, PowerPoint -esitys, saatavilla: [http://www.joensuuntiedepuisto.fi/download/531/jouni\\_koiso-kanttila/pdf](http://www.joensuuntiedepuisto.fi/download/531/jouni_koiso-kanttila/pdf) [viitattu 22.8.2014]

Kokko, E., Ojanen, T., Salonvaara, M., Hukka, A. & Viitanen, H. 1999. Puurakenteiden kosteustekninen toiminta. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1991. 160 s.

Korhonen, T., Hietaniemi, J., Puujulkisivujen paloturvallisuus lähiökerrostaloissa, Espoo 2004, VTT Rakennus- ja yhdyskuntateknikka, VTT Tiedotteita 2253. 58 s. +36 liites.

Koskela, S., Korhonen, M-R., Seppälä, J., Häkkinen, T., Vares, S., 2011, Materiaalinäkökulma rakennusten ympäristöarvioinnissa, Suomen ympäristökeskuksen raportteja 16/2011, Helsinki, Suomen ympäristökeskus, saatavilla: [www.ymparisto.fi/julkaisut](http://www.ymparisto.fi/julkaisut)

Kosteus rakennuksissa, 1999, Rakennustietosäätiö, RT-ohjekortti, RT 05-10710

Künzel, H.M. 1995. Simultaneous heat and moisture transport in building components, One and two-dimensional calculation using simple parameters. Stuttgart, IRB Verlag, Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau. 102 p. + tables and figures.

Kääriäinen, H., Rantamäki, J., Tulla, K. Puurakennusten kosteustekninen toimivuus. Kokemustiedot, Espoo 1998, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Rakennustekniikka, VTT Tiedotteita 1923. 63 s. + 14 liites.

Lahdensivu, J., Suonketo, J., Vinha, J., Lindberg, R., Manelius, E., Kuhno, V., Saastamoinen, K., Salminen, K. & Lähdesmäki, K. 2012. Matalaenergia- ja passiivitalojen rakenteiden ja liitosten suunnittelu- ja toteutusohjeita. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos

Lylykangas, K. Innova -projektin raportti, Passiivikorjaus esivalmistetuilla julkisivuelementeillä - Saturnuksenkatu 2, Riihimäki, Saatavilla: <http://www.paroc.fi/kampanjat/innova-projekti> [viitattu 1.9.2014]

Metsäteollisuus, 2010, Puurakentaminen on ratkaisu, Saatavilla: <http://www.metsateollisuus.fi/mediabank/477.pdf> [viitattu 14.4.2014]

Mäkitalo Mikael 2012. Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka.

Nevander, L.E. & Elmarsson, B. 1994. Fukthandbok, Praktik och teori. 2<sup>nd</sup> ed. Stockholm, AB Svensk Byggtjänst. 538 p.

Nicolai, A. & Grünwald, J. (2006) Delphin 5. User Manual and Program Reference. 113 p.

Nieminen, J., Kouhia, I., Ojanen, T., Knuuti, A. Kosteusteknisesti toimivia korjausrakentamisen periaateratkaisuja, Espoo 2013. VTT Technology 144. 131 s. + 8 liites.

Ojanen, T., Salonvaara, M., Kohonen, R. & Nieminen, J. 1989. Kosteuden siirtymien rakenteissa, Laskentamenetelmät. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 595. 102 s.

Puuinfo, 2011, CLT Cross Laminated Timber, Tekninen tiedote, saatavilla: [www.puuinfo.fi](http://www.puuinfo.fi) [viitattu 15.4.2014]

Puuinfo, Internet-sivut, 2013, Massiivinen jälleenrakentaminen edessä Suomen lähiöissä, Saatavilla: <http://www.puuinfo.fi/ajankohtaista/massiivinen-jalleenrakentaminen-edessa-suomen-lahioissa>, [viitattu 14.4.2014]

Puuinfo, Puujulkisivu lähiökerrostalossa, 2010, Saatavilla: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/puujulkisivu-lahiokerrostaloissa/puujulkisivulahiokerrostalossav101.pdf> [viitattu 14.4.2014]

Puuinfo, Internet-sivut, Puurakentaminen ja ekologinen kestävyys, Saatavilla: <http://www.puuinfo.fi/ymparistoasiat/ekologinen-kestavyys>, [viitattu 14.4.2014]

Puuinfo, Internet-sivut, Puu materiaalina, Kosteusteknisiä ominaisuuksia, Saatavilla: <http://www.puuinfo.fi/puu-materiaalina/kosteusteknisia-ominaisuuksia> [viitattu 16.4.2014]

Puuinfo, Internet-sivut, Karjalainen, M., Puurakentamisen asema ja mahdollisuudet Suomessa, Saatavilla: <http://www.puuinfo.fi/modernit-puukaupungit/puun%20asema%20rakentamisessa> [viitattu 6.8.2014]

RakMK C4. 2003. Lämmöneristys, ohjeet 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 28 s.

RakMK D3. 2012. Rakennusten energiatehokkuus, Määräykset ja ohjeet 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 35 s.

RakMK E1. 2011. Rakennusten paloturvallisuus, Määräykset ja ohjeet, Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 43 s.

RIL 107-2012. 2012. Rakennuksen veden- ja kosteudeneristysohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki.

RIL K161-1993. 1993. Puurakentaminen, Tekniikka ja arkkitehtuuri Osa II: Puun materiaaliominaisuudet ja rakennusfysiikka. Suunnitteluvienti. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki

Ruosteenoja, K., Jylhä, K., Mäkelä, H., Hyvönen, R., Pirinen, P. & Lehtonen, I. 2013. Rakennusfysiikan testivuosien sääaineistot havaitussa ja arvioitussa tulevaisuuden ilmastossa. REFI-B-hankkeen tuloksia. Raportteja 2013:1. Helsinki, Ilmatieteen laitos. 48 s.

Salmi, T., Kemoff, T., Home- ja kosteusongelmat rakennuksissa: mukana esimerkitapauksia, 1996, Suomen kiinteistöliitto, Helsinki

SFS-EN ISO 6946. 2008. Rakenne- ja rakenneosat. Lämmönvastus ja lämmönläpäisykerroin. Laskentamenetelmä. Suomen standardisoimisliitto. 31 s.

SFS-EN ISO 12572. 2001. Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 32 s.

Siikanen, U. 2008. Puurakentaminen. Helsinki, Rakennustieto Oy. 332 s.

Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka, perusteet ja sovellukset. Helsinki, Rakennustieto Oy. 256 s.

Siikanen, U. 1996. Rakennusfysiikka, perusteet ja sovellukset. Helsinki, Rakennustieto Oy. 219 s.

Sisäilmastoluokitus 2008. 2008. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Sisäilmastoyhdistyksen julkaisu 5. Espoo, Sisäilmastoyhdistys ry. 43 s.

Sisäilmayhdistys Internet-sivut, Helsingin, Espoon ja Vantaan Terveelliset tilat, Sisäilmayhdistys ry, 2008, Kosteusvauriot. Saatavilla: <http://www.sisailmayhdistys.fi/terveelliset-tilat-tietojarjestelma/kosteusvauriot/> [Viitattu 31.07.2014]

Sisäilmayhdistys Internet-sivut, Helsingin, Espoon ja Vantaan Terveelliset tilat, Sisäilmayhdistys ry, Mikrobikasvun edellytykset 2008. Saatavilla: <http://www.sisailmayhdistys.fi/terveelliset-tilat-tietojarjestelma/kosteusvauriot/mikrobit/mikrobikasvun-edellytykset/> [Viitattu 01.07.2014]

Sisäilmayhdistys Internet-sivut, Helsingin, Espoon ja Vantaan Terveelliset tilat, Sisäilmayhdistys ry, 2008, Terveysvaikutukset. Saatavilla: <http://www.sisailmayhdistys.fi/terveelliset-tilat-tietojarjestelma/terveysvaikutukset/> [Viitattu 06.11.2014]

Soikkeli, A. 2011. Puun mahdollisuudet lähiöiden korjauksissa. Oulu. Oulun yliopisto, arkkitehtuurin osasto,

Stora Enso, CLT-info, Internet-sivut, Saatavilla: <http://www.clt.info/en/> [Viitattu 22.5.2014]

Stora Enso Building and Living, Building Solutions, Technical Folder, 2012, Stora Enso, Saatavilla: <http://www.clt.info/en/media-downloads/brochures/broschuren/>

Suomen virallinen tilasto (SVT): Asunnot ja asuinolot [verkkojulkaisu]. ISSN=1798-6745. 2008, Asuinolot Suomessa vuonna 2008 . Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu:6.8.2014].

Saatavilla: [http://www.stat.fi/til/asas/2008/asas\\_2008\\_2009-12-15\\_kat\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/asas/2008/asas_2008_2009-12-15_kat_001_fi.html)

TES Energy Facade, Energiatohokkuuden parantaminen puurunkoisilla ja esivalmis-  
teisilla julkisivuelementeillä, Teknillinen Korkeakoulu, Tutkimushankkeen loppura-  
portti, 2009, Helsinki

Tolppanen, J., Karjalainen, M., Lahtela, T. & Viljakainen, M. 2013. Suomalainen  
puukerrostalo – Rakenteet, suunnittelu ja rakentaminen. Helsinki. Puuinfo. Opetus-  
hallitus. 194 s.

Tulamo, T. 2010, Lääkkeitä lähiöön, Diplomityö, Aalto-yliopisto, Teknillinen kor-  
keakoulu, arkkitehtuurin laitos.

Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 2011. CLT -rakenteiden rakennusfysikaalinen  
toimivuus. Tutkimusraportti Nro VTT-S-08847-11.

Vinha, J. 2007. Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in  
Finnish Climatic Conditions: A Method for Determining the Sufficient Water Va-  
pour Resistance of the Interior Lining of a Wall Assembly. Tampere, Tampere Uni-  
versity of Technology. 338 p. + app. 10 p.

Vinha, J. 2009. Rakennusten rakennusfysikaalisen suunnittelun ja rakentamisen peri-  
aatteet. Helsinki. Rakentajain kalenteri, Rakennustieto Oy.

Vinha, J. 2011. Rakennusfysiikan opintomoniste. Koonnut Juha Vinha. Tampereen  
teknillinen yliopisto. Rakennetekniikka.

Vinha, J., Laukkanen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Ke-  
ro, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno,  
V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A. &  
Palolahti, T. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset  
vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutukses-  
sa. TTY Tutkimusraportti 159. 354 s. + 43 liites.

Vinha, J., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Paajanen, L.,  
Strander, T. & Iitti, H. Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisriskin las-  
kennallinen arviointi. Tutkimusraportti 143, Tampereen teknillinen yliopisto, Raken-  
netekniikka. *Julkaistaan myöhemmin.*

Wufi Software. Fraunhofer IBP. Internet-sivut, [viitattu 23.4.2014]. Saatavilla:  
[http://www.wufi.de/index\\_e.html](http://www.wufi.de/index_e.html).

## **LIITTEET**

**Liite 1: Laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet**

**Liite 2: Materiaalien tasapainokosteuskäyrät**

**Liite 3: Rakennusfysikaaliset testivuodet**

## Liite 1: Laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet

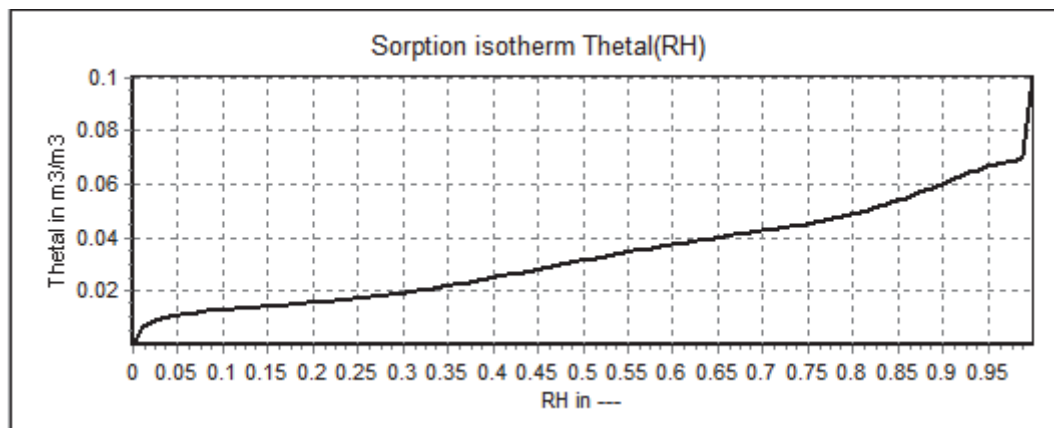
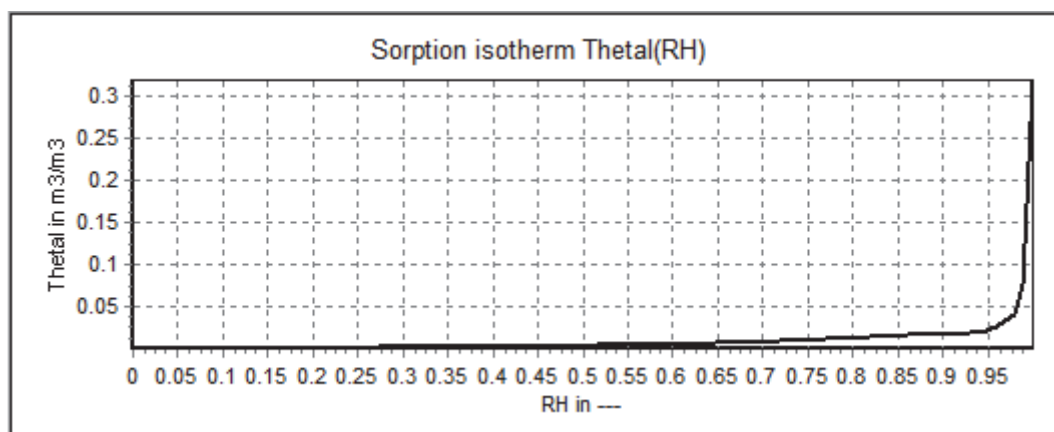
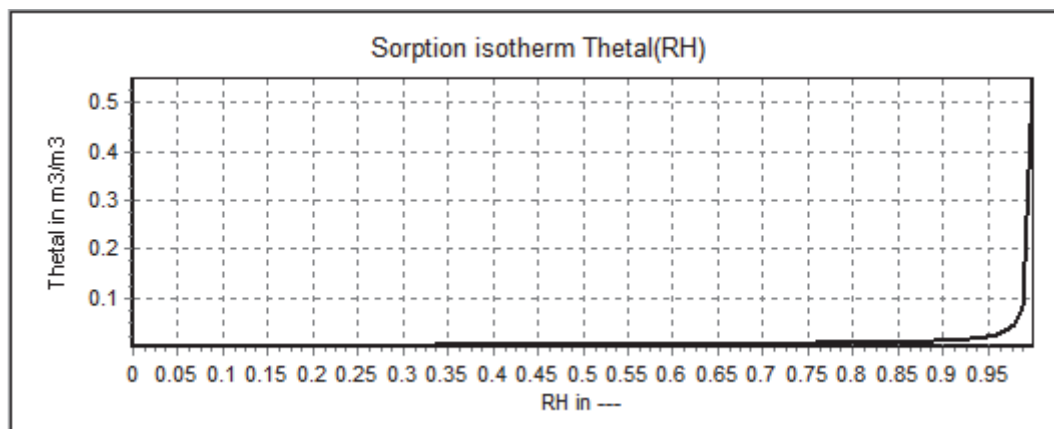
| Materiaali                  | Tiheys<br>[kg/m³] | Ominaislämpö-<br>kapasiteetti<br>[J/(kg·K)] | Lämmön-<br>johtavuus<br>[W/(m·K)] | Huokoisuus<br>[m³/m³] | Vesihöyryn dif-<br>fuusiovastus-<br>kerroin [-] |         |
|-----------------------------|-------------------|---|-----------------------------------|-----------------------|---|---------|
| Betoni B35                  | 2384.38           | 839   | 2.55                              | 0.10                  | 220   | DELPHIN |
| Normaali tiili              | 1786.25           | 889   | 0.55                              | 0.35                  | 18  | DELPHIN |
| 1. Kipsilevy                | 850.00            | 850   | 0.20                              | 0.65                  | 10  | DELPHIN |
| Mineraalivilla              | 30.00             | 840   | 0.04                              | 0.92                  | 1   | DELPHIN |
| Kuusi (syyn suuntaan)       | 519.92            | (kuiva) 1189                                | 0.13                              | 0.70                  | 236   | DELPHIN |
| Tuulensuojavilla            | 30.00             | 840   | 0.03                              | 0.92                  | 5   | DELPHIN |
| Ilmaväli 25 mm              | 1.30              | 1050  | 0.14                              | 1.00                  | 0   | DELPHIN |
| Ilmaväli 40 mm              | 1.30              | 1050  | 0.22                              | 1.00                  | 0   | DELPHIN |
| Ilmaväli 50 mm              | 1.30              | 1050  | 0.28                              | 1.00                  | 0   | DELPHIN |
| Kalkkisementtirappauslaasti | 1270              | 960   | 0.55                              | 0.5                   | 12  | DELPHIN |
| Ilma                        | 1.25              | 1000  | 4.00                              | 1.00                  | 1   | FRAME   |
| Kuusivaneri                 | 394.00            | 1500  | 0.11                              | 0.65                  | 232   | FRAME   |
| 2. Kipsilevy                | 774.00            | 1100  | 0.19                              | 0.60                  | 8   | FRAME   |
| Puukuitulevy                | 280.00            | 1500  | 0.05                              | 0.85                  | 5   | FRAME   |
| Höyrynsulku 0,2 mm          | 980.00            | 2300  | 0.15                              | 0.00                  | 89000   | FRAME   |
| Ilmansulkupaperi            | 767.00            | 1000  | 0.23                              | 0.67                  | 1766  | OMA     |
| Tuulensuojakangas           | 222.00            | 2000  | 0.15                              | 0.59                  | 22  | OMA     |
| DuPont Tyvek DPT            | 463.03            | 1000  | 0.23                              | 0.59                  | 519   | OMA     |
| Pavatex LDB                 | 381.27            | 1000  | 0.23                              | 0.67                  | 188   | OMA     |
| Rappauslevy                 | 1150              | 850   | 0.36                              | 0.67                  | 66  | OMA     |

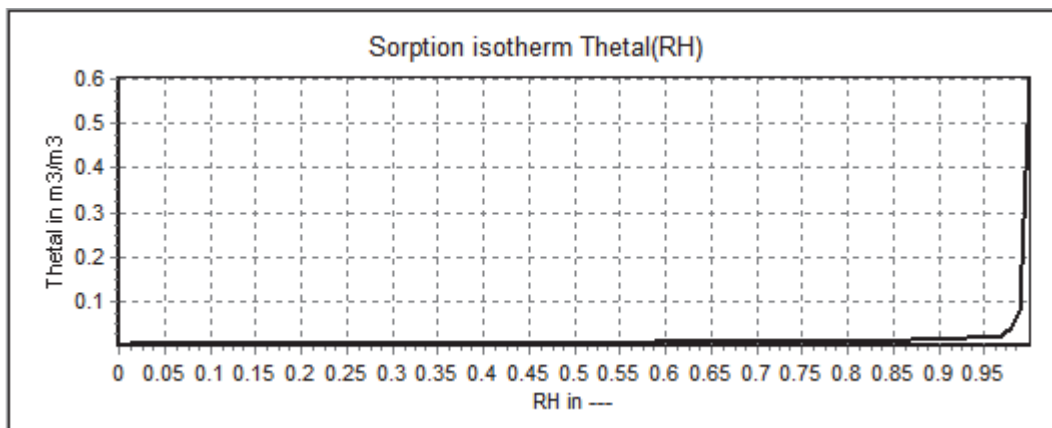
### Näennäisvastusten arvot

|                         |                                       |            |
|-------------------------|---------------------------------------|------------|
| Tuulensuojavillanpinta: | Vapour diffusion thickness (sd-value) | 0.06 m     |
|                         | Air convection resistance value       | 320 000m/s |
| Pelti rakenteessa US2:  | Vapour diffusion thickness (sd-value) | 98 m       |
|                         | Water conduction resistance value     | 5e+15 m/s  |
|                         | Air convection resistance value       | 5e+12 m/s  |
| Höyrynsulku:            | Vapour diffusion thickness (sd-value) | 50 m       |
|                         | Water conduction resistance value     | 5e+15 m/s  |
|                         | Air convection resistance value       | 5e+12 m/s  |
| Ilmansulkupaperi:       | Vapour diffusion thickness (sd-value) | 4 m        |
|                         | Air convection resistance value       | 360 000m/s |

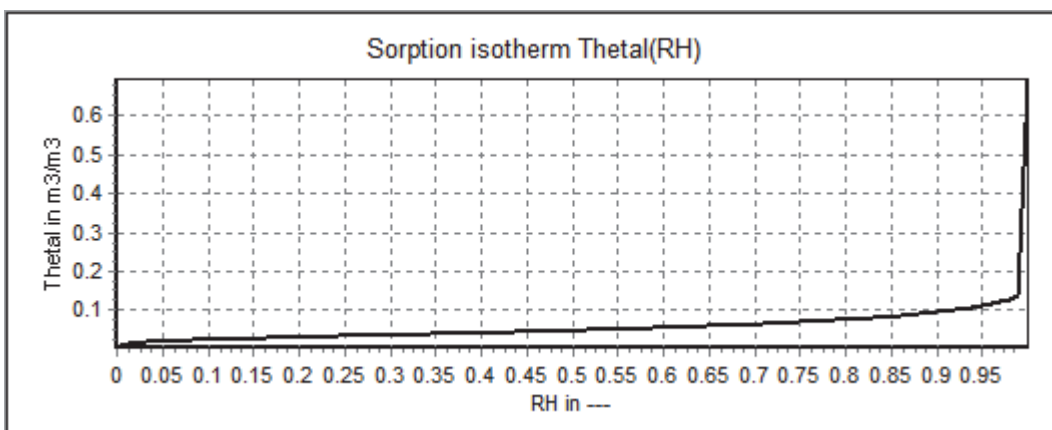
Materiaaliominaisuuksien perässä on ilmoitettu onko materiaaliominaisuudet peräisin Delphinin omasta materiaalikirjastosta, FRAME-tutkimuksessa käytetyistä materiaaleista vai onko materiaali muokattu itse kirjallisuudesta löytyvien tietojen perusteella. Jos tarkasteluissa on samaa materiaalia, mutta hieman eri ominaisuuksilla, on materiaalit numeroitu.



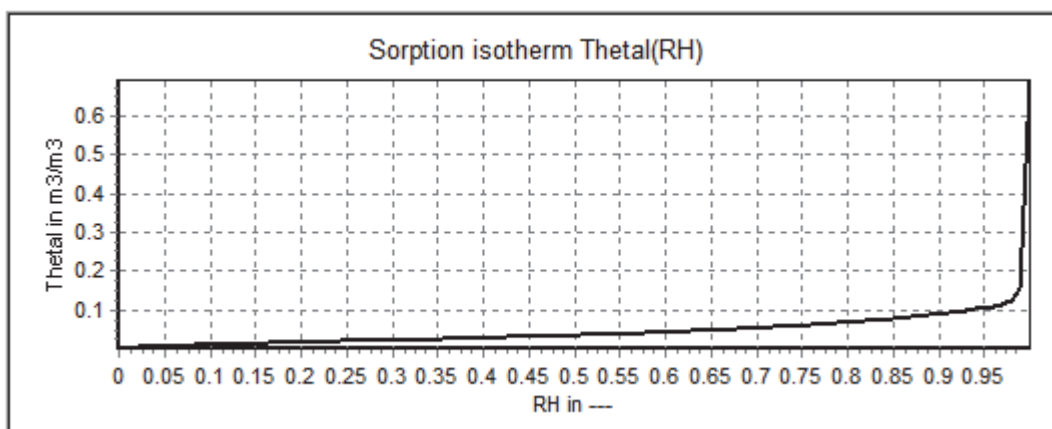
**Liite 2: Materiaalien tasapainokosteuskäyrät*****Kuva L2.1 Betonin B35 tasapainokosteuskäyrä******Kuva L2.2 Tiilen tasapainokosteuskäyrä******Kuva L2.3 Kipsilevyn tasapainokosteuskäyrä***



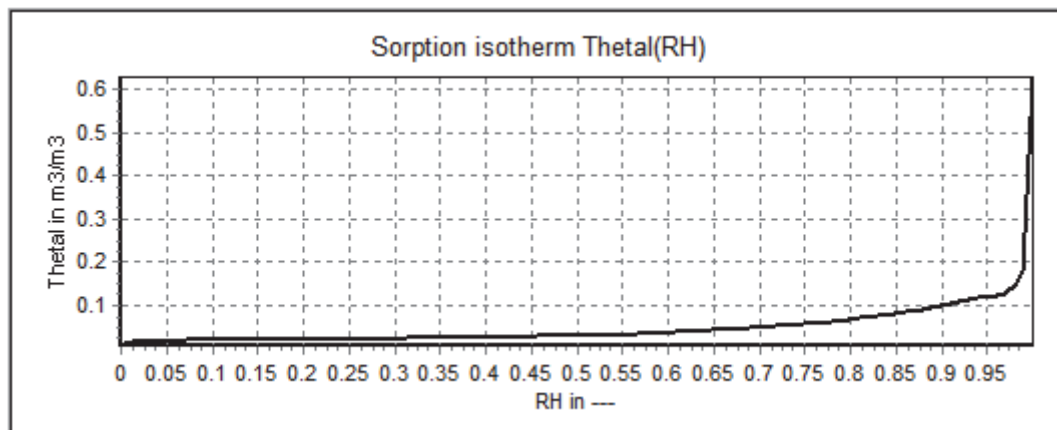
**Kuva L2.4 2. Kipsilevyn tasapainokosteuskäyrä**



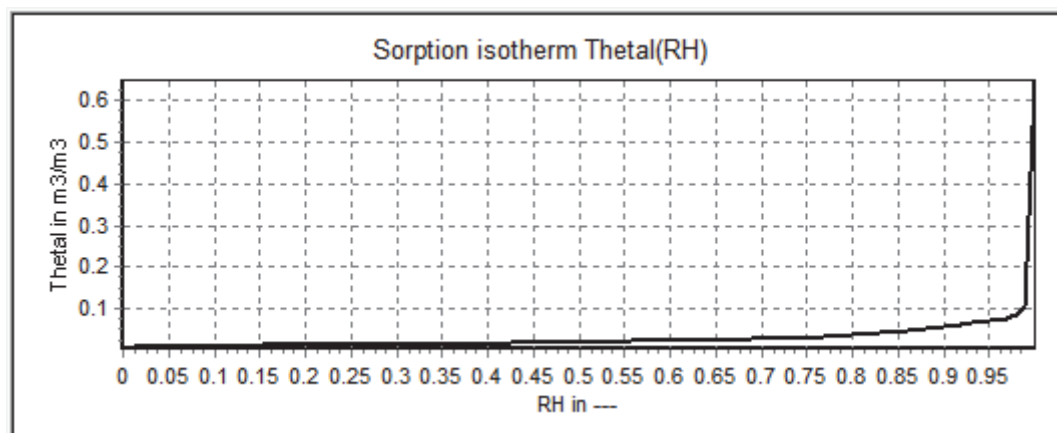
**Kuva L2.5 1. Kuusen tasapainokosteuskäyrä**



**Kuva L2.6 2. Kuusen tasapainokosteuskäyrä**



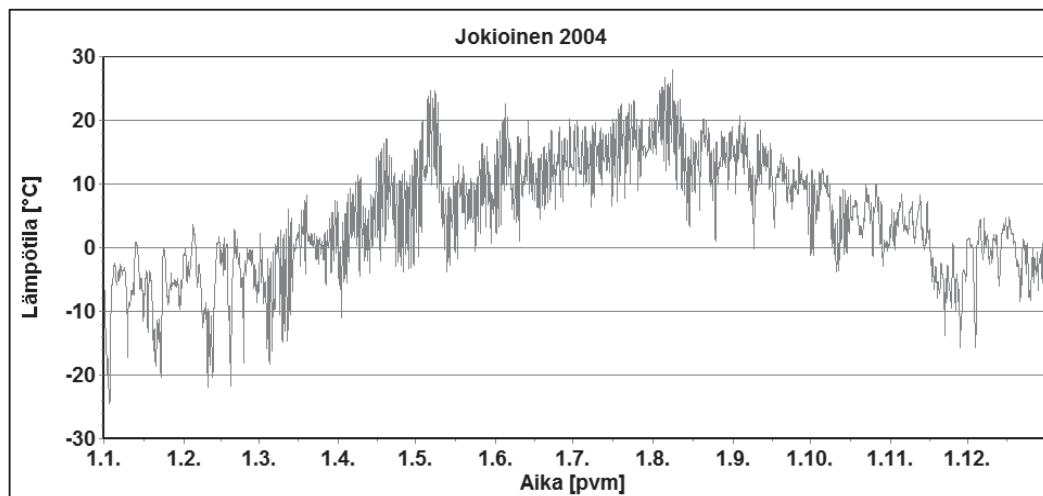
**Kuva L2.7** Kuusivanerin tasapainokosteuskäyrä



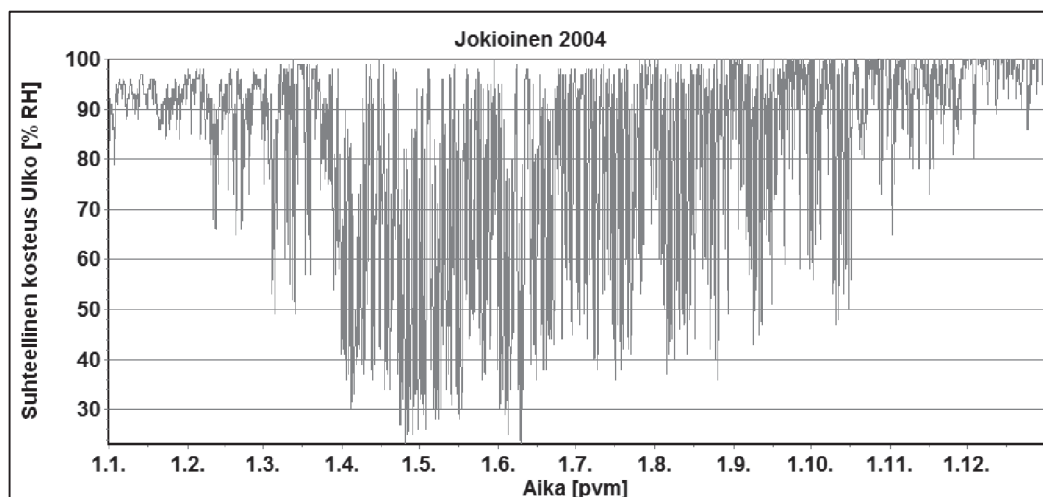
**Kuva L2.8** Puukuitulevyn tasapainokosteuskäyrä

### Liite 3: Rakennusfysikaaliset testivuodet

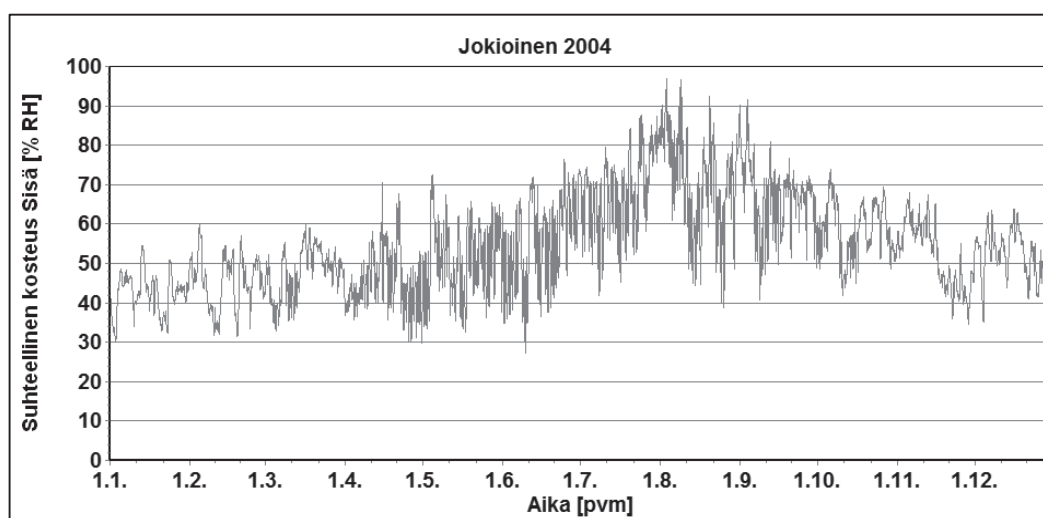
#### Jokioinen 2004



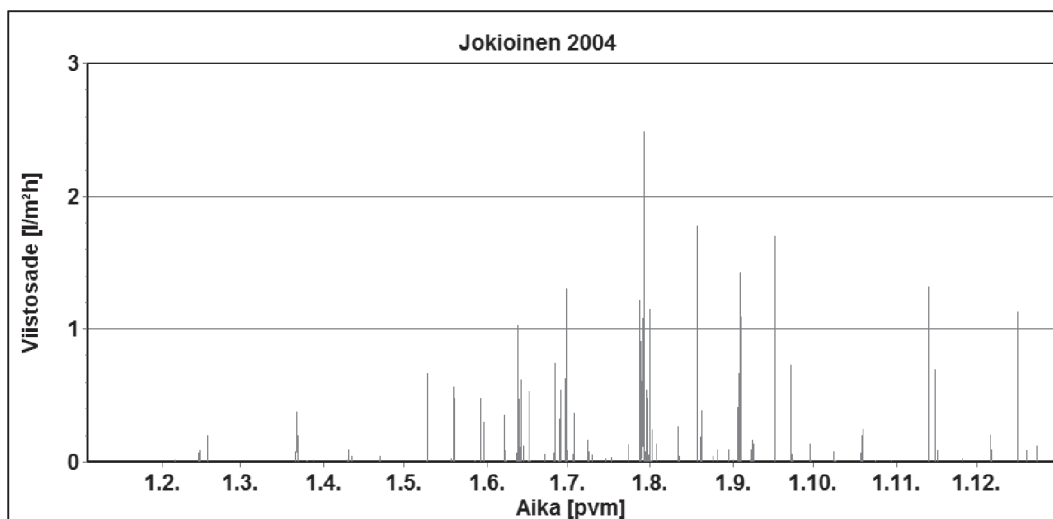
*Kuva L3.1 Ulkoilman lämpötila Jokioisissa 2004*



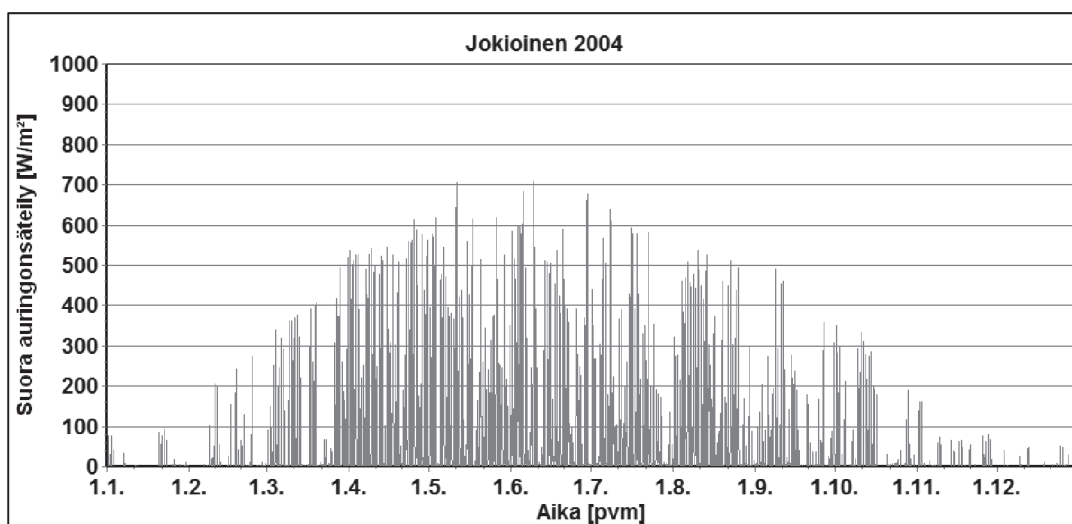
*Kuva L3.2 Ulkoilman suhteellinen kosteus Jokioisissa 2004*



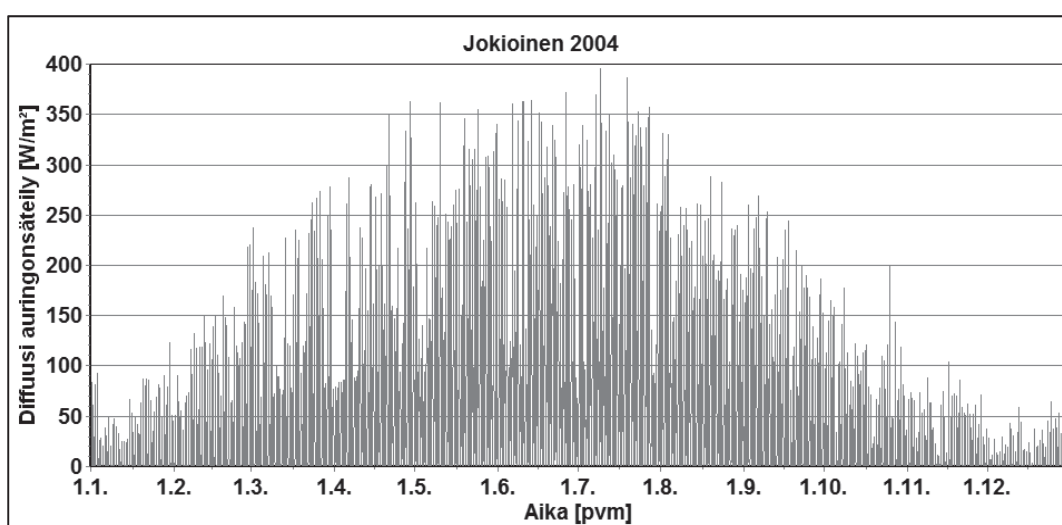
*Kuva L3.3 Sisäilman suhteellinen kosteus Jokioisissa 2004*



*Kuva L3.4 Viistosateen määrä pohjoisjulkisivulle Jokioisissa 2004*

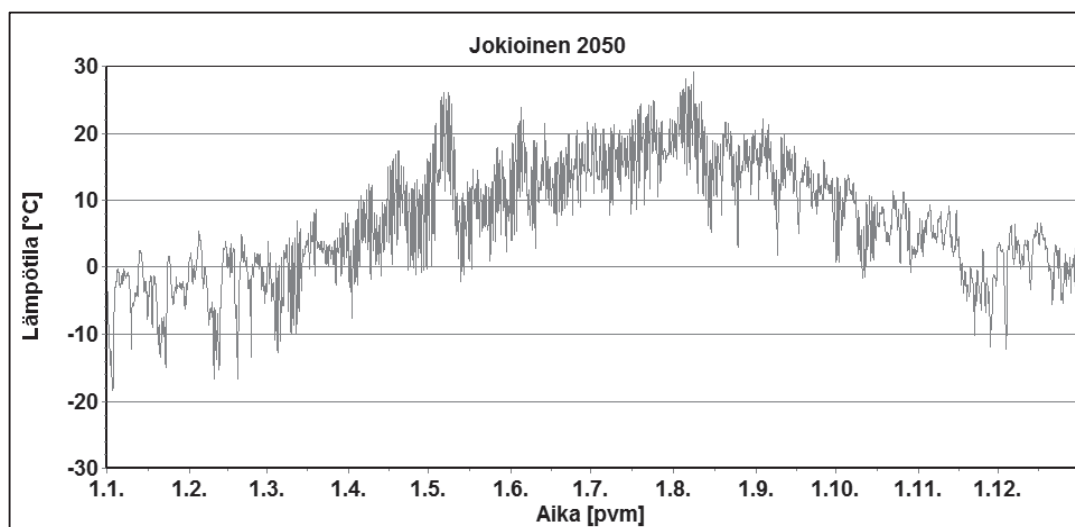


*Kuva L3.5 Suoran auringonsäteilyn määrä vaakapinnalle Jokioisissa 2004*

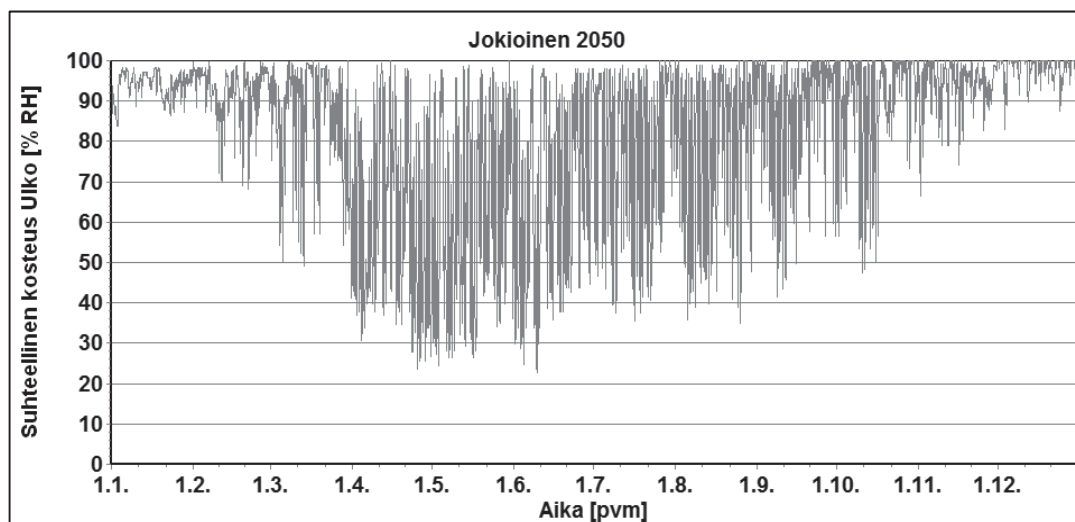


*Kuva L3.6 Diffuusin auringonsäteilyn määrä vaakapinnalle Jokioisissa 2004*

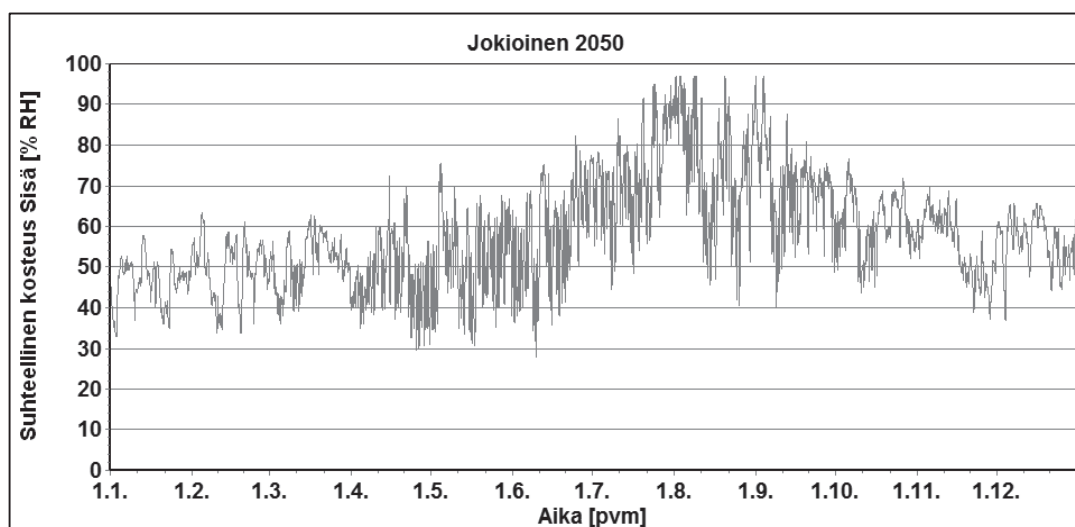
## Jokioinen 2050



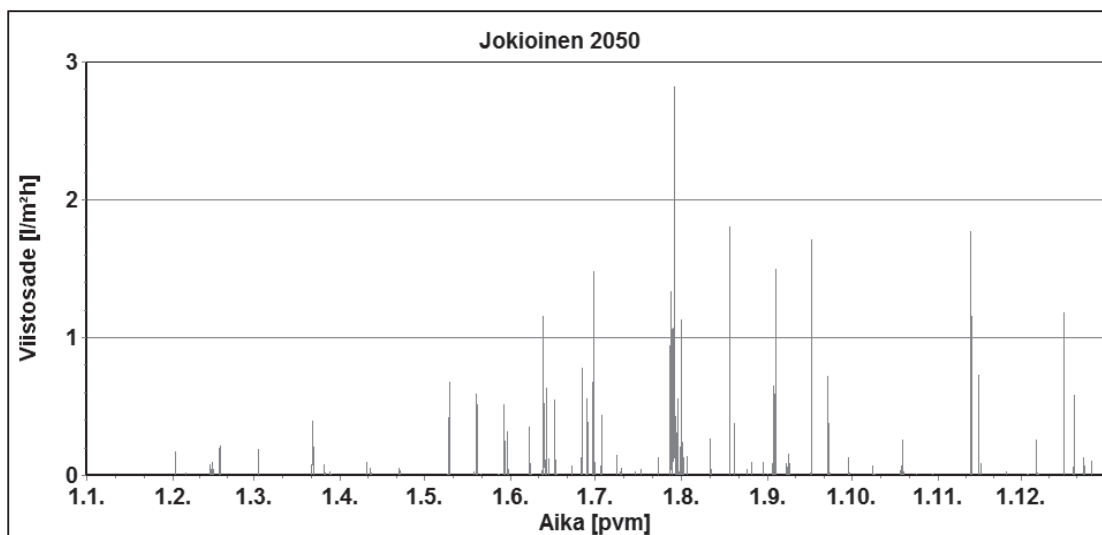
*Kuva L3.7 Ulkoilman lämpötila Jokioisissa 2050*



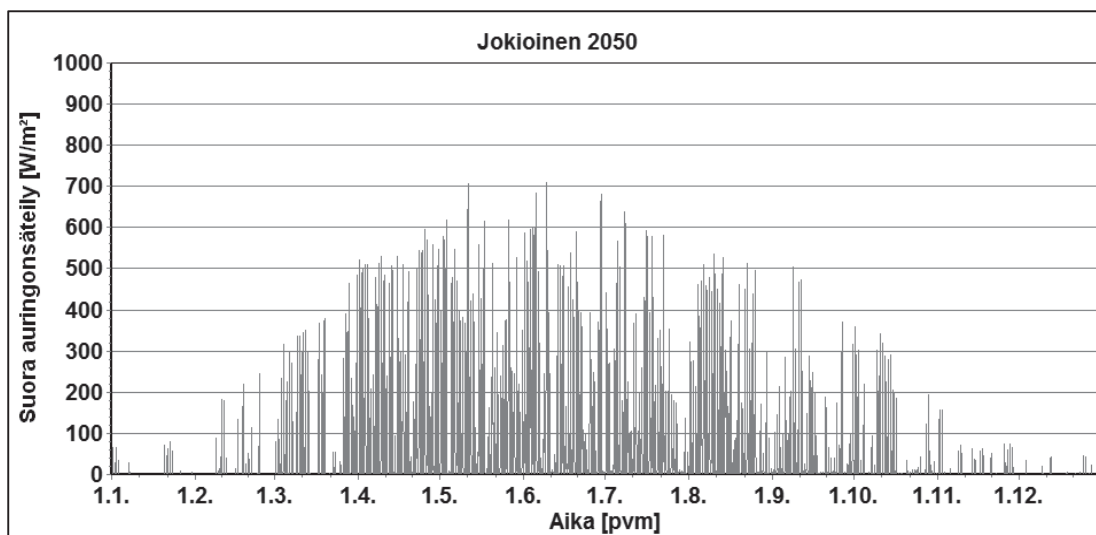
*Kuva L3.8 Ulkoilman suhteellinen kosteus Jokioisissa 2050*



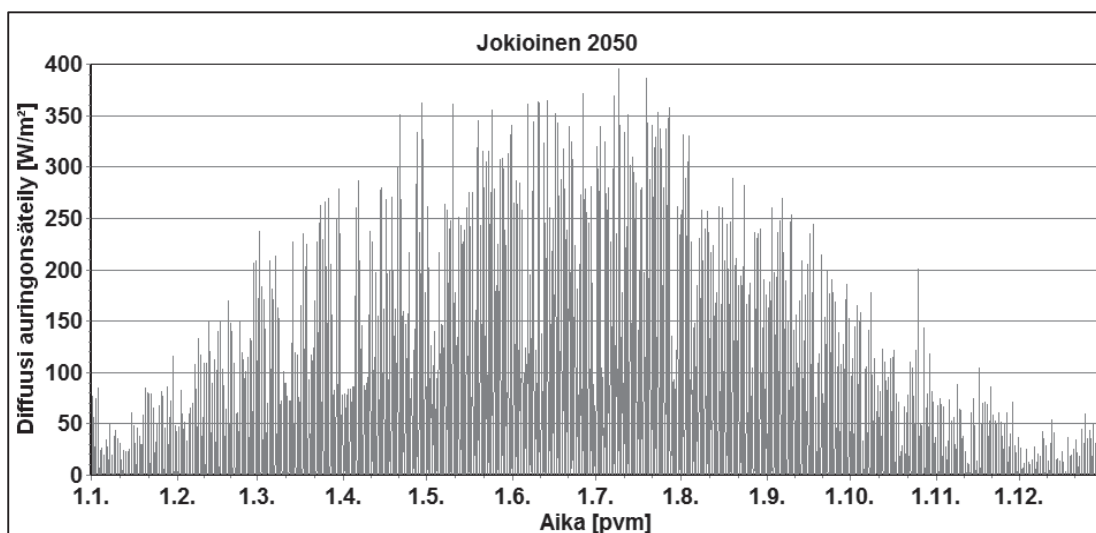
*Kuva L3.9 Sisäilman suhteellinen kosteus Jokioisissa 2050*



*Kuva L3.10 Viistosateen määrä pohjoisjulkisivulle Jokioisissa 2050*

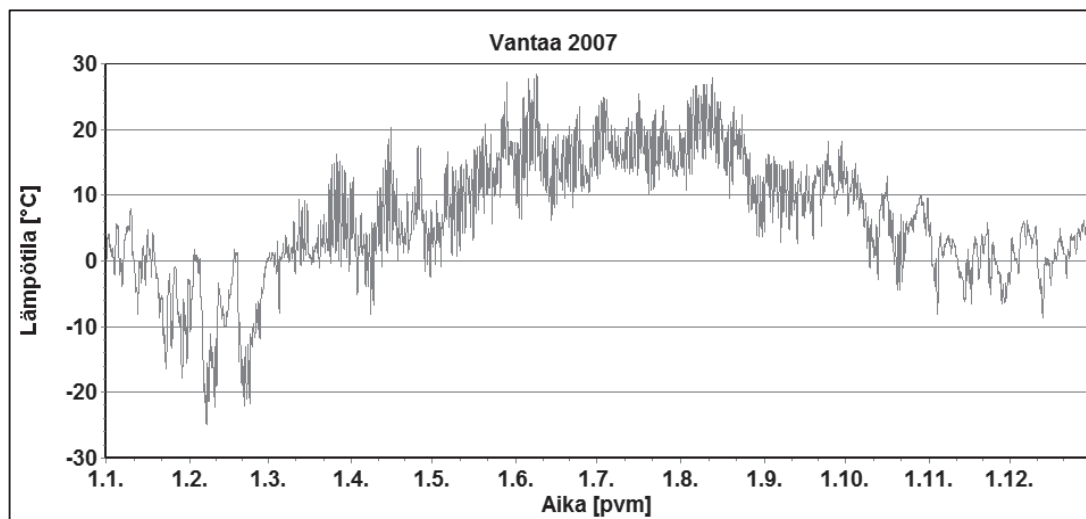


*Kuva L3.11 Suoran auringonsäteilyn määrä vaakapinnalle Jokioisissa 2050*

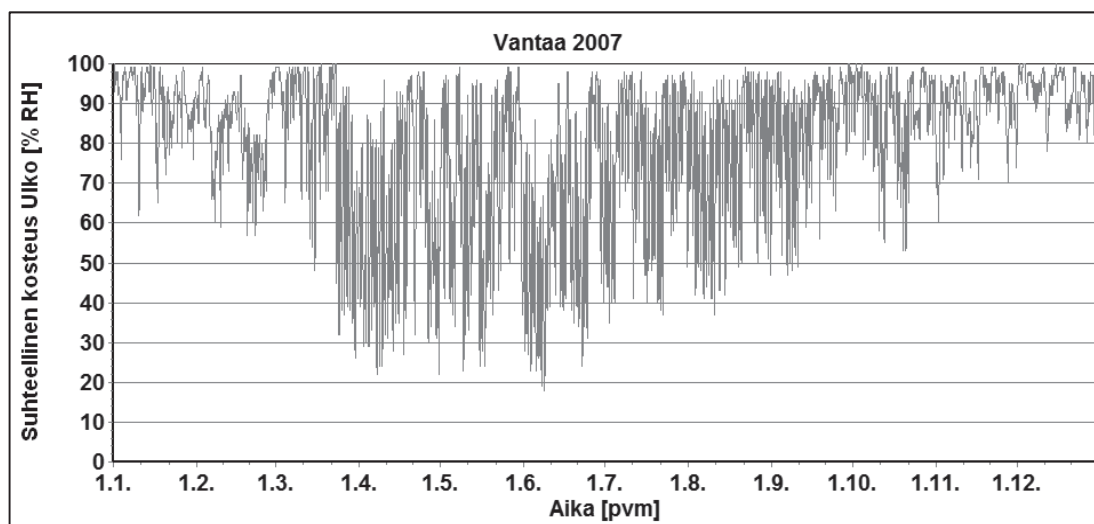


*Kuva L3.12 Diffuusin auringonsäteilyn määrä vaakapinnalle Jokioisissa 2050*

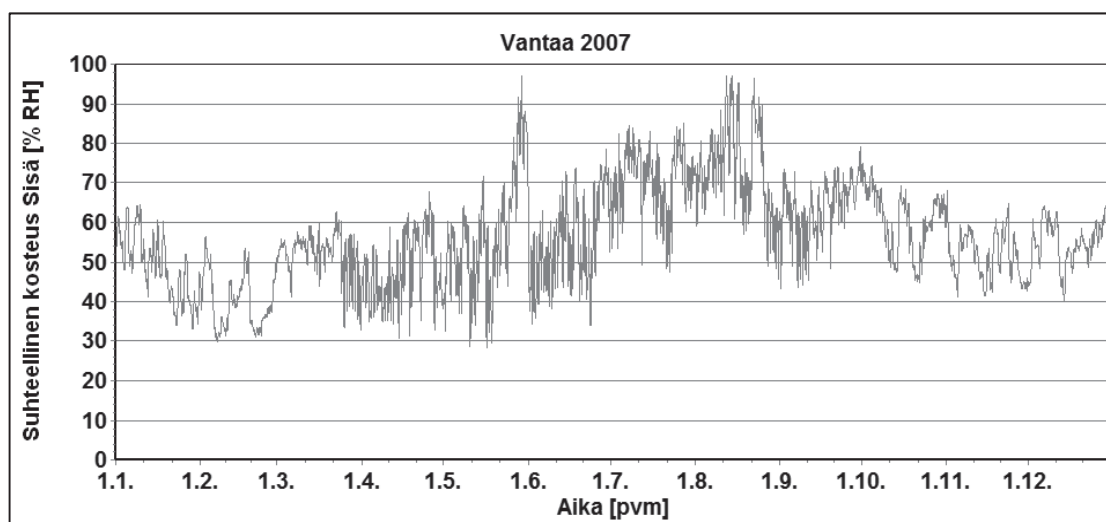
### Vantaa 2007



*Kuva L3.13 Ulkoilman lämpötila Vantaalla 2007*

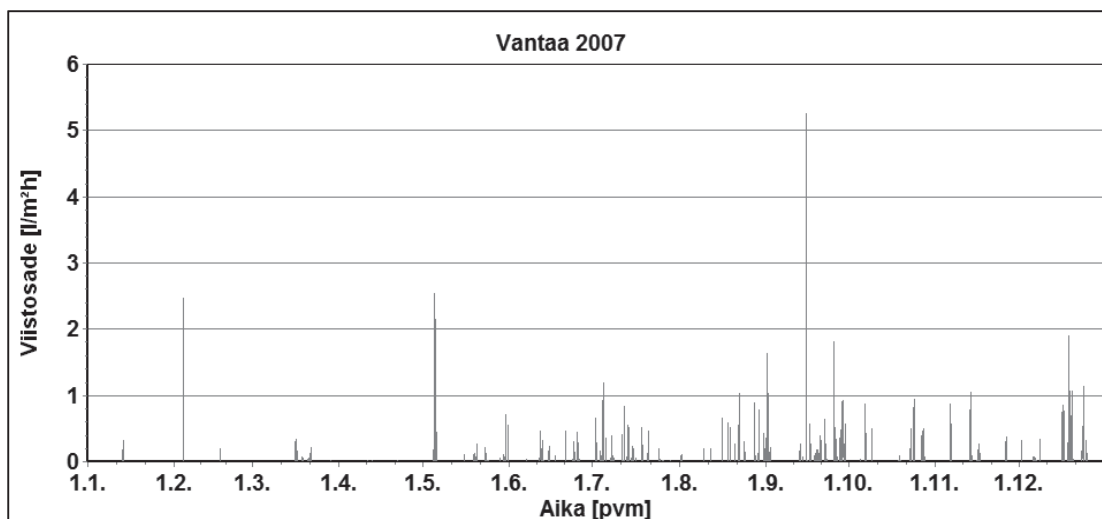


*Kuva L3.14 Ulkoilman suhteellinen kosteus Vantaalla 2007*

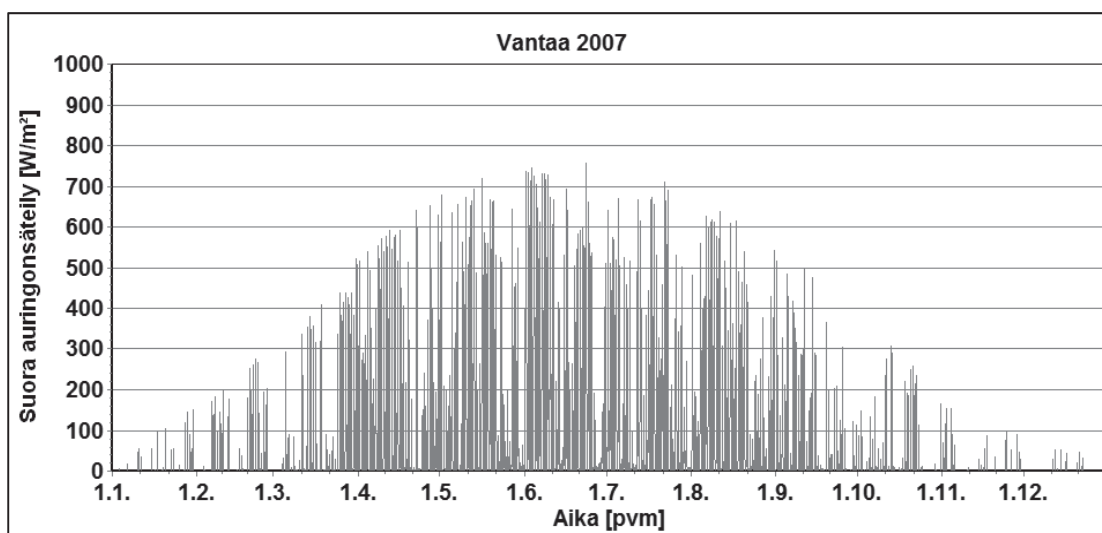


*Kuva L3.15 Sisäilman suhteellinen kosteus Vantaalla 2007*

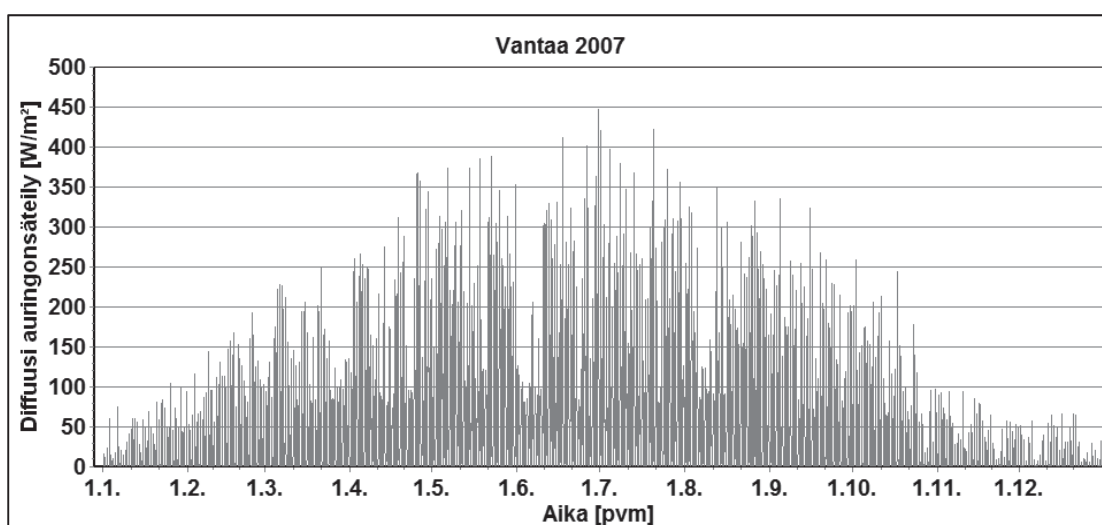




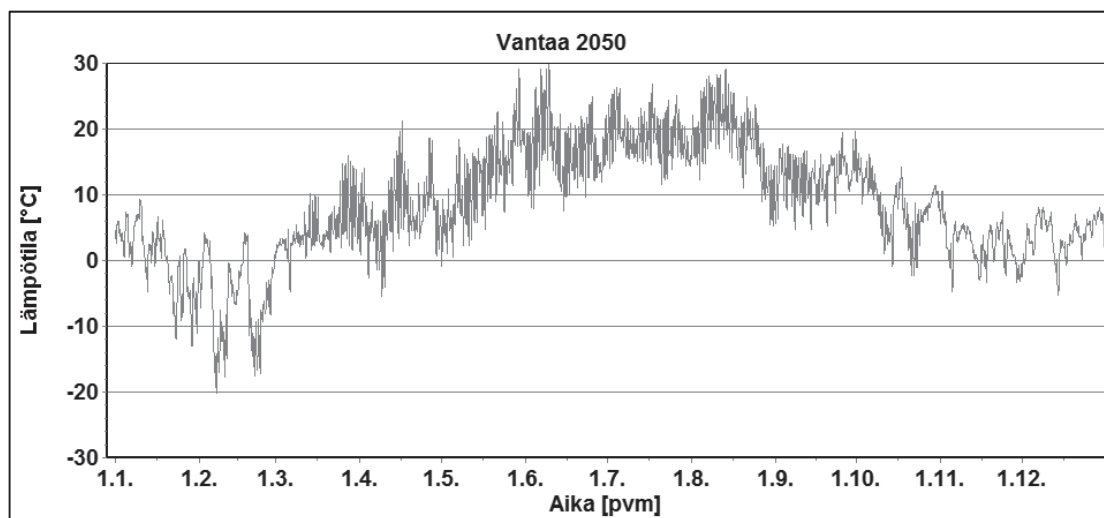
*Kuva L3.16 Viistosateen määrä eteläjulkisivulle Vantaalla 2007*



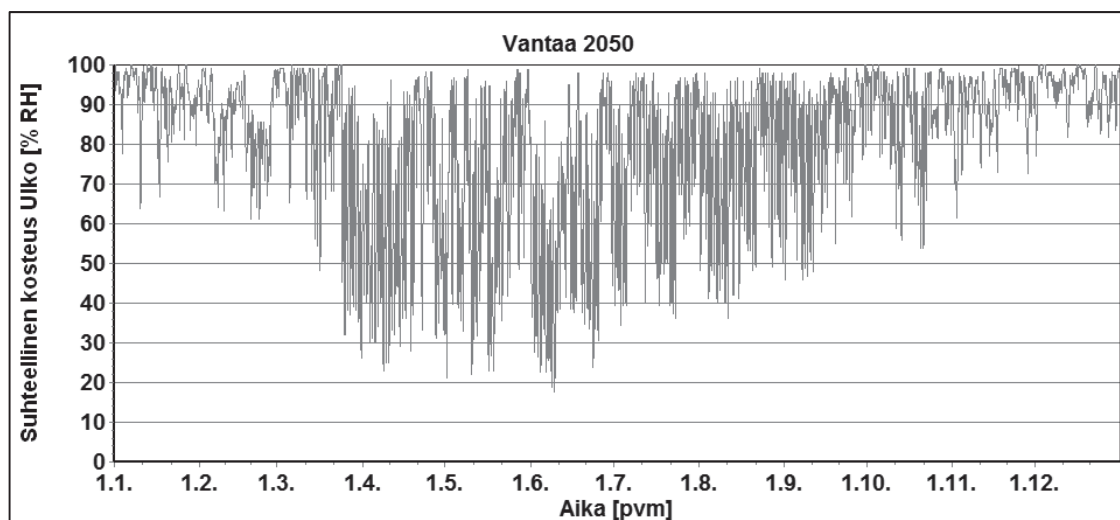
*Kuva L3.17 Suoran auringonsäteilyn määrä vaakapinnalle Vantaalla 2007*



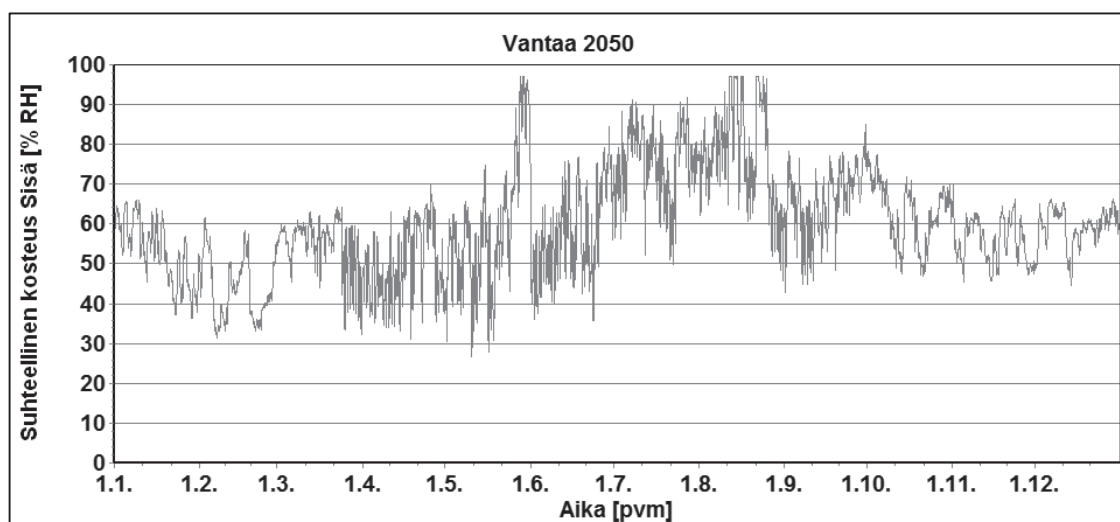
*Kuva L3.18 Diffuusin auringonsäteilyn määrä vaakapinnalle Vantaalla 2007*

**Vantaa 2050**

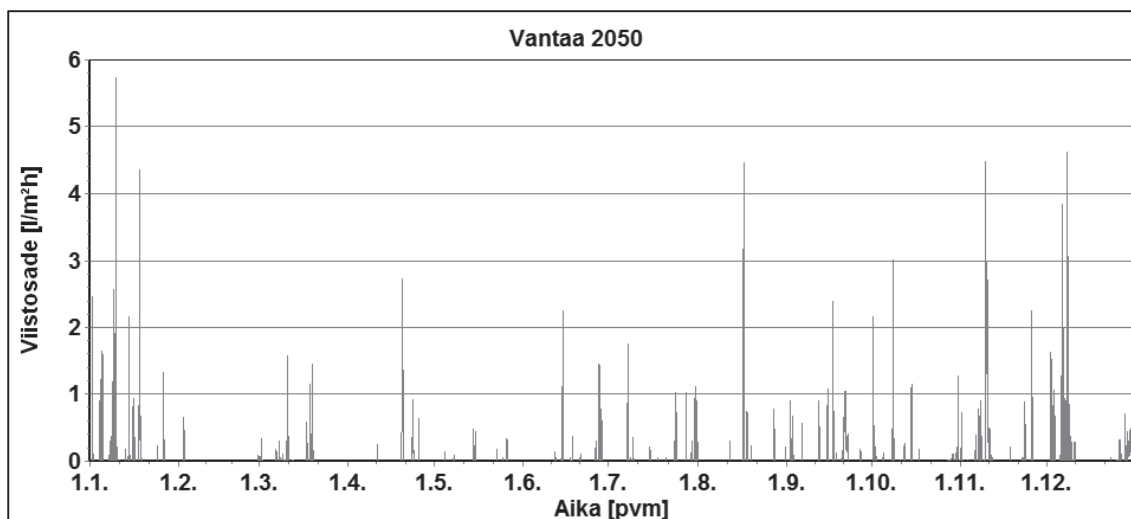
*Kuva L3.19 Ulkoilman lämpötila Vantaalla 2050*



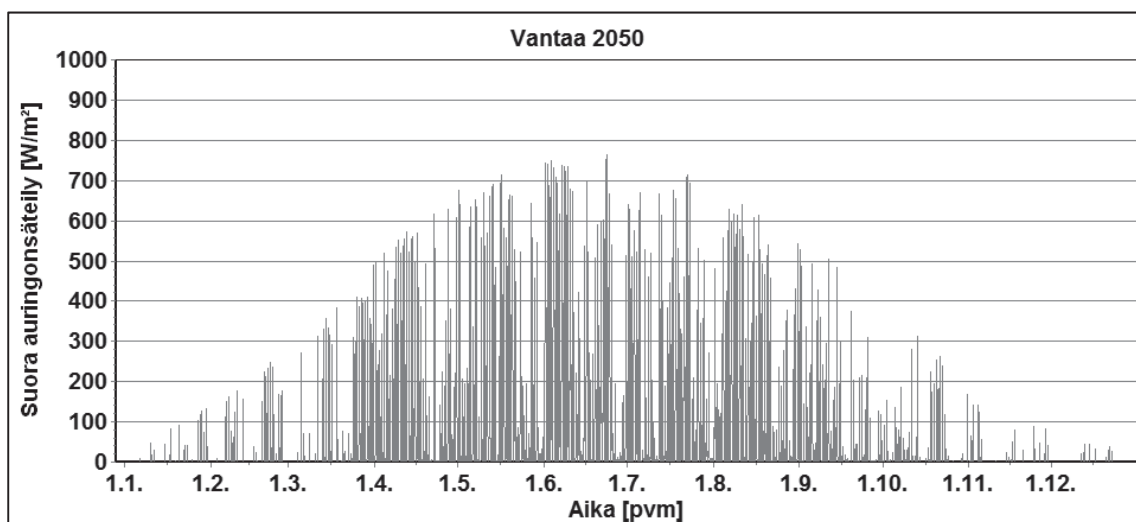
*Kuva L3.20 Ulkoilman suhteellinen kosteus Vantaalla 2050*



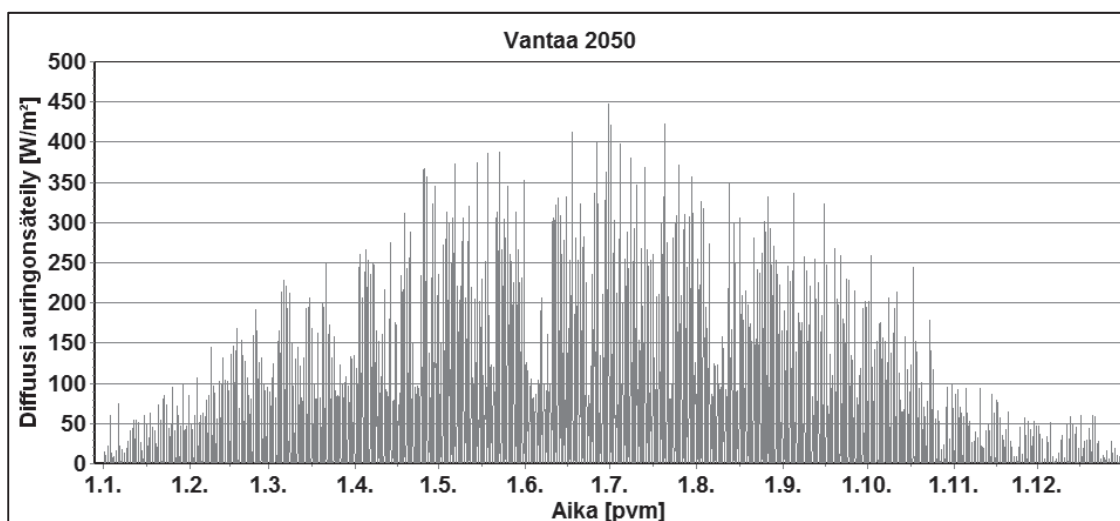
*Kuva L3.21 Sisäilman suhteellinen kosteus Vantaalla 2050*



*Kuva L3.22 Viistosade eteläjulkisivulle Vantaalla 2050*



*Kuva L3.23 Suora auringonsäteily vaakapinnalle Vantaalla 2050*



*Kuva L3.24 Diffuusi auringonsäteily vaakapinnalle Vantaalla 2050*